

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE ECONOMIA  
MONOGRAFIA DE BACHARELADO

# UMA ANÁLISE SOBRE A FLEXIBILIDADE DO SETOR ELÉTRICO NO CONTEXTO DE AUMENTO DA PARTICIPAÇÃO DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS VARIÁVEIS NA MATRIZ ELÉTRICA GLOBAL

LORRANE DA SILVA COSTA CÂMARA  
Matrícula nº: 111214118

ORIENTADOR: Prof. Ronaldo Goulart Bicalho

JANEIRO 2015

*As opiniões expressas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do autor*

Dedico este trabalho aos meus pais, meus maiores exemplos de vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus por ter me permitido chegar até aqui. A minha família, por ter me apoiado durante toda a minha trajetória na graduação, e em especial aos meus pais, que trilharam comigo cada passo dessa jornada, me dando todo o apoio nos momentos difíceis e vibrando com todas as minhas conquistas, sem eles essa conquista não seria possível. A minha irmã, por estar sempre ao meu lado, e a minha avó, que tanto me apoiou e torceu pelo meu sucesso.

Ao Grupo de Economia da Energia, onde encontrei grandes exemplos de docentes, extremamente competentes e, acima de tudo, sempre dispostos a ajudar e a transmitir sua experiência.

Ao Professor Bicalho, pela orientação, infinita paciência e pela compreensão demonstrada.

Por fim, ao Instituto de Economia da UFRJ, onde tanto me orgulho de ter estudado na graduação.

## **RESUMO**

O objetivo da presente monografia é realizar uma análise acerca do papel a ser desempenhado pelas tecnologias de estocagem de energia no atual contexto de crescente participação das fontes renováveis variáveis na matriz elétrica global. Para tanto, procura-se apresentar os fatores motivadores dessa transição e seus principais impactos no setor elétrico, evidenciando como esses fatores culminam no aumento da demanda do setor por flexibilidade. No cenário apresentado, as tecnologias de armazenamento de energia emergem como alternativa de flexibilização do setor. Apresentam-se, assim, as principais vantagens associadas aos sistemas de estocagem e as principais barreiras à sua difusão.

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Resumo acerca das principais tecnologias de estocagem.....	38
Tabela 2: Estratégias de superação das principais barreiras à difusão dos sistemas de estocagem .....	41

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Contribuições setoriais para a redução das emissões.....	12
Figura 2: Participação anual atual e projetada da geração eólica e solar fotovoltaica .....	13
Figura 3: Variação abrupta da carga no Brasil durante os Jogos da Copa do Mundo de 2010	15
Figura 4: Ilustração do Efeito Ordem de Mérito .....	17
Figura 5: Comparação entre o tempo de <i>ramping</i> de diferentes tecnologias .....	22
Figura 6: Erro de previsão absoluto como percentual da capacidade de geração eólica na Finlândia em 2004 .....	23
Figura 7: Tipos de programa de integração pelo lado da demanda .....	26
Figura 8: Carga do sistema com e sem regulação .....	30
Figura 9: Aplicações das tecnologias de estocagem em termos de tempo de descarga e capacidade .....	31
Figura 10: Aplicações dos ativos de estocagem ao longo de um sistema elétrico hipotético ..	32
Figura 11: Atual capacidade global de estocagem de energia conectada à rede (MW) .....	33
Figura 12: Relação entre a capacidade instalada de geração nuclear e a capacidade instalada de armazenamento via bombeamento hidráulico .....	34
Figura 13: Comparação entre tecnologias alternativas de estocagem de energia em termos de capacidade e tempo de descarga.....	36
Figura 14: Nível de maturidade das tecnologias de estocagem apresentadas .....	36

## **SÍMBOLOS, ABREVIATURAS, SIGLAS E CONVENÇÕES.**

ERV – Energias Renováveis Variáveis

AIE – Agência Internacional de Energia

DOE – U.S. Department of Energy



## ÍNDICE

INTRODUÇÃO .....	9
CAPÍTULO I – A QUESTÃO DA FLEXIBILIDADE .....	11
<i>I.1- A inserção das fontes renováveis de energia na matriz energética global.....</i>	<i>11</i>
<i>I.2- O impacto da inserção das renováveis nos sistema elétricos.....</i>	<i>13</i>
CAPÍTULO II– SOBRE AS FONTES DE FLEXIBILIDADE DO SETOR ELÉTRICO .....	21
<i>II.1. As soluções tradicionais .....</i>	<i>21</i>
<i>II.1.1. A geração térmica despachável.....</i>	<i>21</i>
<i>II.1.2. Expansão e modernização da infraestrutura de rede .....</i>	<i>22</i>
<i>II.2- A integração pelo lado da demanda.....</i>	<i>23</i>
<i>II.3- Tecnologias de estocagem de energia.....</i>	<i>26</i>
CAPÍTULO III – MAPEAMENTO DAS PRINCIPAIS BARREIRAS AO AVANÇO DA ESTOCAGEM E DOS ESPAÇOS PARA ATUAÇÃO DE POLÍTICAS DE INCENTIVO.....	39
<i>III.1. Principais barreiras à difusão das tecnologias de estocagem .....</i>	<i>39</i>
III.2. Espaços para a atuação do governo .....	41
<i>III.3. A questão regulatória.....</i>	<i>43</i>
CONCLUSÃO .....	46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	47

## INTRODUÇÃO

O substancial aumento da participação das fontes renováveis intermitentes no mix de geração elétrica, sobretudo da energia eólica e da energia solar fotovoltaica, responde aos esforços mundiais empregados no sentido de diversificar a oferta de energia e de reduzir as emissões de carbono associadas aos sistemas elétricos. Na medida em que consistem em fontes variáveis de energia, estando sua capacidade de produção subordinada à disponibilidade do fator energético primário, sua maior integração resulta na necessidade de adaptação do sistema elétrico como um todo, posto que a variabilidade inerente a essas fontes pode ter impacto negativo na confiabilidade e na segurança da oferta de eletricidade.

Dentre os desafios relacionados à expansão das fontes renováveis variáveis se destacam o risco e a incerteza associados à intermitência, o fato de não consistirem em fontes capazes de operar na base de geração de eletricidade, não podendo fornecer capacidade firme, e por fim, o fato do pico de geração a partir das renováveis não necessariamente coincidir com o pico de demanda. A associação desses fatores resulta num contexto de crescente imprevisibilidade dos sistemas elétricos, tanto no que tange a demanda quanto a oferta de energia, o que impõe grandes dificuldades de gestão. Deste modo, duas alternativas se apresentam: a construção de parques geradores com capacidade de atender os picos de carga que ocorrem em ocasiões relativamente raras, ao que se associam os custos de manutenção de sistemas de back-up que operam, necessariamente, com determinado grau de ociosidade; ou, por outro lado, o investimento em soluções capazes de conferir maior flexibilidade ao sistema, de modo a viabilizar a integração das renováveis de forma eficiente em termos de custos.

Neste cenário, quatro fontes de flexibilidade ganham destaque: a estocagem de energia, a integração pelo lado da demanda, a expansão da infraestrutura da rede e a geração térmica despachável. Focaremos, no entanto, na estocagem de energia, apresentando as tecnologias de estocagem disponíveis, as vantagens relacionadas à sua implementação e os desafios e barreiras à sua difusão.

A estocagem engloba as tecnologias capazes de absorver energia elétrica em um determinado momento e retornar esta energia posteriormente, e são caracterizadas de acordo com o princípio que exploram para armazenar energia, o tempo de resposta, duração da carga

e intervalo de descarga, e sua escala e localização no sistema elétrico. Uma das principais vantagens da estocagem consiste na sua capacidade de atuar tanto como fonte de geração de energia quanto como fonte de demanda de eletricidade, de modo a absorver energia durante picos de geração e retornar essa energia em períodos de pico de demanda.

A estocagem de energia emerge, portanto, como eficaz fonte da flexibilidade necessária a esses sistemas. Considera-se que a disponibilidade de tecnologias de estocagem distribuída a baixos custos desempenharia papel crucial no setor elétrico, de modo a contribuir para a solução de algumas das principais questões associadas à integração das fontes renováveis variáveis. Considerando os atuais custos e níveis de desempenho das tecnologias de estocagem disponíveis, no entanto, é pouco provável que consistam em uma força de transformação por si só.

Cabe ressaltar, ainda, que a estocagem de energia também pode ser aplicada em sistemas isolados da rede, como em pequenos sistemas domésticos alimentados por painéis fotovoltaicos, facilitando o acesso a energia elétrica e reduzindo os custos associados à conexão de áreas remotas a infraestrutura de transmissão e distribuição de eletricidade, podendo exercer um importante papel no que tange aos esforços internacionais de viabilizar o acesso à energia moderna ao redor mundo, sobretudo nos países subdesenvolvidos.

Destaca-se, deste modo, a necessidade de cooperação internacional no sentido promover maiores investimento em pesquisa e desenvolvimento das tecnologias de estocagem, o que, associado a políticas governamentais, poderia resultar em consideráveis avanços no sentido de redução de custos e aumento de eficiência.

## CAPÍTULO I – A QUESTÃO DA FLEXIBILIDADE

### *1.1- A inserção das fontes renováveis de energia na matriz energética global*

Ao redor do mundo diversas medidas e políticas em prol da difusão das fontes renováveis de energia vêm sendo adotadas. De acordo com dados da Agência Internacional de Energia (IEA, 2014e), em 2013 cerca de \$120 bilhões em subsídios foram empregados no desenvolvimento de tecnologias associadas a fontes de energia renováveis, consideradas “elemento crítico” da política de abastecimento global de energia baseada em baixa emissão de carbono. De acordo com Dantas (2008, apud Castro *et al.*, 2009, p.8): “A principal causa dos maciços investimentos em energia renovável é a necessidade de se garantir a segurança do suprimento sujeito às restrições impostas pela necessidade de se mitigar o aquecimento global.”

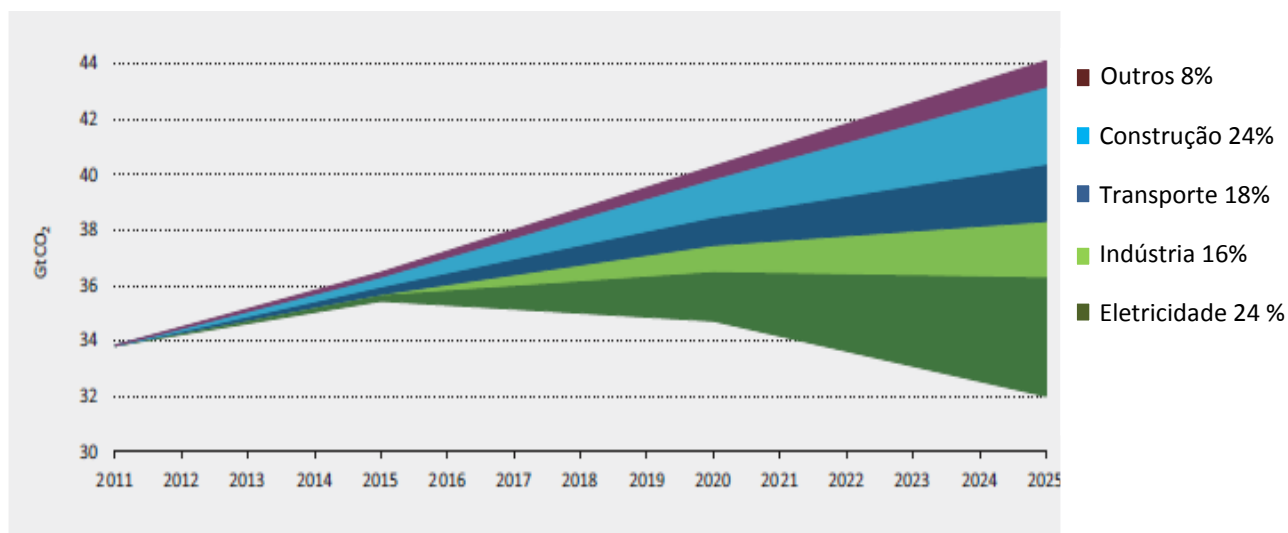
Segundo Manyika *et al.* (2013) as fontes renováveis, como a solar e a eólica, têm sido cada vez mais adotadas em economias desenvolvidas como os Estados Unidos e a União Europeia, onde políticas de promoção e incentivo às renováveis ganham cada vez mais espaço. Castro *et al.* (2009) aponta que no caso dos países desenvolvidos essa estratégia responde aos objetivos de reduzir as emissões de carbono e de aumentar a segurança energética, na medida em que contribui para a redução da dependência em relação a importação de combustíveis fósseis de regiões com elevada instabilidade geopolítica. Em países emergentes como China e Índia, por sua vez, estão em curso agressivos planos de estímulo à adoção das renováveis. Essas políticas teriam como objetivo central viabilizar o acelerado crescimento econômico, ao qual se associa a crescente demanda de energia, paralelo a mitigação de crescentes preocupações acerca das emissões de carbono e dos impactos ambientais.

Costa e Prates (2005) apontam que dentre as principais vantagens associadas à maior participação das fontes renováveis se destacam a diversificação da matriz energética, o que contribui para a redução do risco de abastecimento e respectivo aumento da segurança energética, a melhoria das condições ambientais e de saúde, via redução da poluição, além da crucial contribuição para o cumprimento de metas ambientais, a exemplo da redução das

emissões de gases-estufa. Hashimura (2012) destaca, ainda, que o uso dessas fontes incentiva a inovação tecnológica e, respectivamente, a criação de mercados e de novos empregos, promovendo crescimento econômico, e contribui para a redução da pobreza, na medida em que viabiliza o melhor acesso à energia.

É previsto que, com a acelerada redução dos custos e suporte contínuo, as renováveis respondam por cerca de metade do aumento da geração de energia elétrica projetado até 2040. “A eletricidade é a forma de energia final com crescimento mais celerado, no entanto, o setor elétrico contribui mais que qualquer outro para a redução da participação dos combustíveis fósseis no *mix* energético global.” (tradução nossa) (AIE, 2014e). A Figura 1 apresenta a contribuição setorial para a redução das emissões de carbono, em um sistema energético consistente com um cenário projetado levando em conta a elevação da temperatura média global em 2°C no horizonte considerado. Fica evidente no gráfico a importância do setor elétrico nessa transição.

**Figura 1: Contribuições setoriais para a redução das emissões**



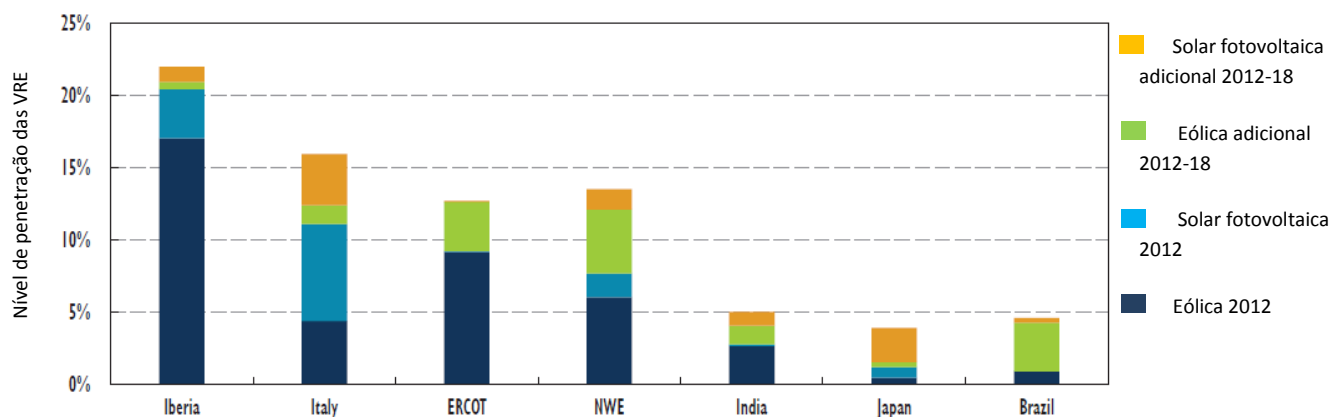
Fonte: AIE, 2014e.

De acordo com projeções da AIE (2014e), a nível global a energia eólica seria responsável por 34% do aumento da geração renovável; já a energia hidráulica responderia por uma parcela de 30%, seguida pela energia solar, com 18%. Espera-se, ainda, que até 2040 as fontes renováveis alcancem a participação de um terço na geração mundial de eletricidade.

“A geração elétrica renovável continua progredindo rapidamente (...). Cresceu 5,5% anualmente entre 2006 e 2013, contra 3% de crescimento anual de 2006 a 2013, e a

expectativa é de que cresça cerca de 40% entre 2013 e 2018 (cerca de 5,8% anualmente) (...).” (AIE, 2014d, P.20). A Figura 2 (AIE, 2014c) mostra os dados correntes e a projeção de curto prazo sobre a participação da energia eólica e solar fotovoltaica na geração anual de energia.

**Figura 2: Participação anual atual e projetada da geração eólica e solar fotovoltaica**



Nota: os cálculos são baseados nas projeções de demanda

Fonte: AIE. 2014c.

A mudança para uma matriz energética mais limpa, no entanto, traz para o centro das discussões os desafios econômicos, tecnológicos e institucionais associados a essa transição. A intermitência inerente a essas fontes resulta na redução do grau de disponibilidade e de controle dos sistemas elétricos, de modo que não se trata apenas de adicionar capacidade de geração a partir das fontes renováveis variáveis, representadas pela energia eólica e a solar fotovoltaica, mas de adaptar todo o sistema a esse novo contexto. Coloca-se em pauta a necessidade de soluções que viabilizem o avanço das renováveis concomitantemente a manutenção da confiabilidade dos sistemas elétricos. “Nesse caso, trata-se de dar às renováveis o mesmo grau de disponibilidade e controle apresentado pelos fósseis; que em termos de fontes marcadas pela intermitência, implica em alterar duas das suas características essenciais: não-estocabilidade e baixa densidade.” (BICALHO, 2013).

## ***1.2- O impacto da inserção das renováveis nos sistema elétricos***

De acordo com a Agência Internacional de Energia (2014c), as fontes de energia renováveis têm desempenhando papel cada vez mais importante no sentido de diversificar a oferta de energia e de reduzir as emissões de carbono associadas aos sistemas elétricos. No entanto, o substancial aumento da participação de Energias Renováveis Variáveis (ERV) no

*mix* de geração elétrica pode implicar em grandes desafios a serem enfrentados pelo setor. Nesse sentido, destaca-se a importância do planejamento para que essa integração seja bem sucedida.

Apesar da complexidade trazida pela intermitência de novas fontes de geração de origem renovável, a integração dessas fontes de geração limpa é essencial para que os países reduzam suas emissões poluentes ligadas à geração de eletricidade e respeitem seus engagements internacionais de política climática. É justamente por sua importância que sua integração deve ser bem planejada. (FERRAZ, 2012)

No sentido de analisar o impacto da inserção dessas fontes na estabilidade do sistema elétrico é necessário o conhecimento de algumas das características da geração das ERV, sendo as mais relevantes: baixo custo no curto prazo, pois uma vez que instalados, os geradores podem produzir energia elétrica a custos reduzidos; incerteza, posto que a previsão acerca da disponibilidade do recurso primário só apresenta alta precisão no curto prazo; variabilidade, do que resulta que a disponibilidade de energia elétrica varia de acordo com a disponibilidade do recurso; restrição espacial, ou seja, a qualidade do recurso não é a mesma em todos os lugares, e seu transporte não é possível; modularidade, na medida em que a escala individual de produção das ERV costuma ser muito inferior à geração convencional, a partir de plantas nucleares ou fósseis, por exemplo; e por fim, não são conectadas à rede de forma sincronizada (AIE, 2014c).

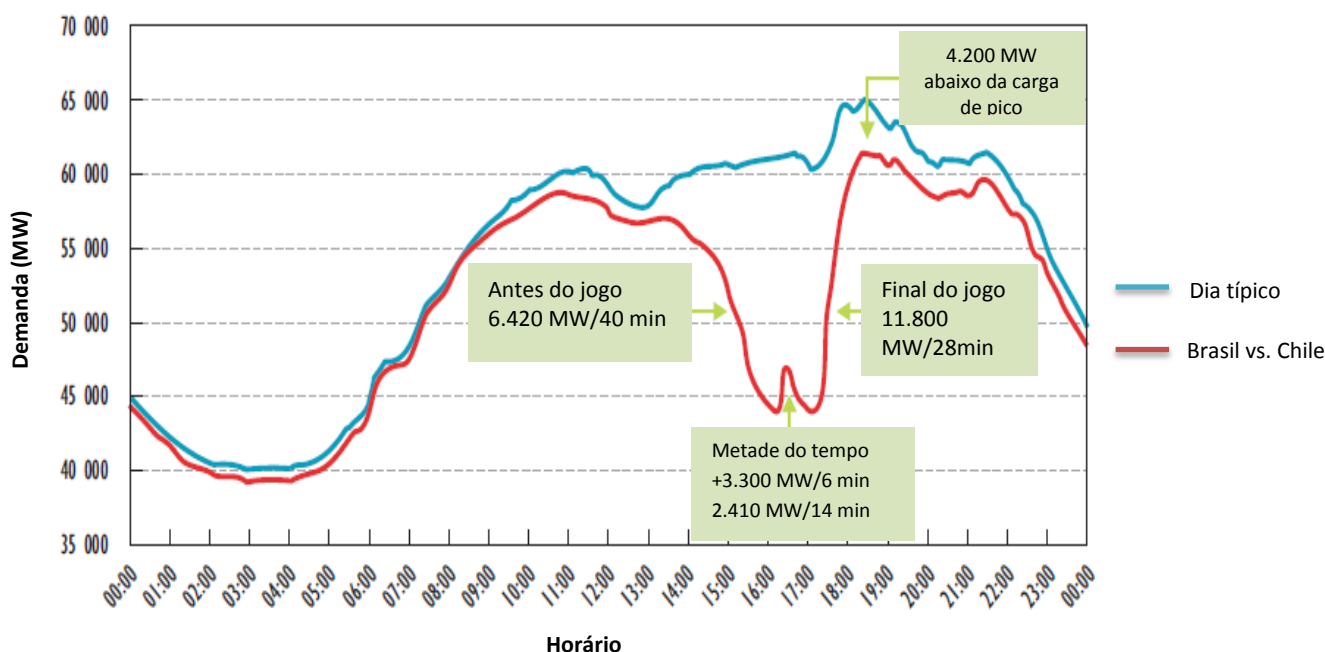
Losekann (2003) aponta que a energia elétrica não consiste em um bem economicamente estocável em grandes quantidades, o que implica na necessidade de operação dos sistemas elétricos em tempo real, sendo o ajuste entre oferta e demanda praticamente instantâneo. Deste modo, para coordenar a operação do setor, é preciso que o despacho das centrais geradoras seja programado, através da definição prévia das quantidades a serem geradas. Posto que essa antecipação não é perfeita, para alcançar o equilíbrio em tempo real se faz necessária a manutenção de reservas operacionais.

Mesmo os sistemas elétricos tradicionais, baseados em fontes firmes de geração, como o carvão ou o gás natural, contam, portanto, com certo grau de incerteza e de variabilidade. A variabilidade estaria ligada, basicamente, a demanda, enquanto a incerteza consistiria em uma característica fundamentalmente associada à oferta de energia (AIE, 2014c).

A variabilidade da demanda fica evidente nas variações da carga ao longo do dia e na sazonalidade do consumo de energia elétrica. Logo, a geração é balizada pela expectativa de demanda, e embora as técnicas de previsão de carga sejam bastante desenvolvidas, há a possibilidade de flutuações imprevistas e respectiva necessidade de ajustes emergenciais. A

Figura 3 mostra uma situação de flutuação abrupta da carga. Assim, os sistemas demandam tradicionalmente uma flexibilidade relacionada à demanda, em geral alcançada através da construção de sobre capacidade.

**Figura 3: Variação abrupta da carga no Brasil durante os Jogos da Copa do Mundo de 2010**



Fonte: AIE, 2014c

“Para assegurar a confiabilidade, o sistema elétrico tem que ser “sobre projetado” e “sobre construído” para atender a maior carga anual, ou seja, o pico de carga que ocorre em ocasiões relativamente raras.” (tradução nossa) (AIE, 2014a, P.241). Essa solução “clássica” envolve, entretanto, custos elevados, associados principalmente à ociosidade do investimento.

Segundo a AIE (2014c) a incerteza tradicionalmente associada à oferta de energia decorre principalmente de falhas de operação nas plantas de geração ou em outros componentes do sistema, assim como de desvios das plantas em relação à operação programada. Deste modo, “[R]eservas de compensação do sistema são necessárias para lidar com as flutuações de curto prazo (de minutos a horas) causadas ou por mudanças na demanda ou por falhas nas centrais elétricas ou nas redes elétricas.” (tradução nossa) (GROSS *et al.*, 2006, P.8)

Nos sistemas com maior inserção das renováveis variáveis, no entanto, observa-se o aumento da incerteza e da variabilidade associadas à oferta, de modo que passa a se demandar uma flexibilidade bidimensional, ou seja, tanto pelo lado da demanda quanto pelo da oferta.



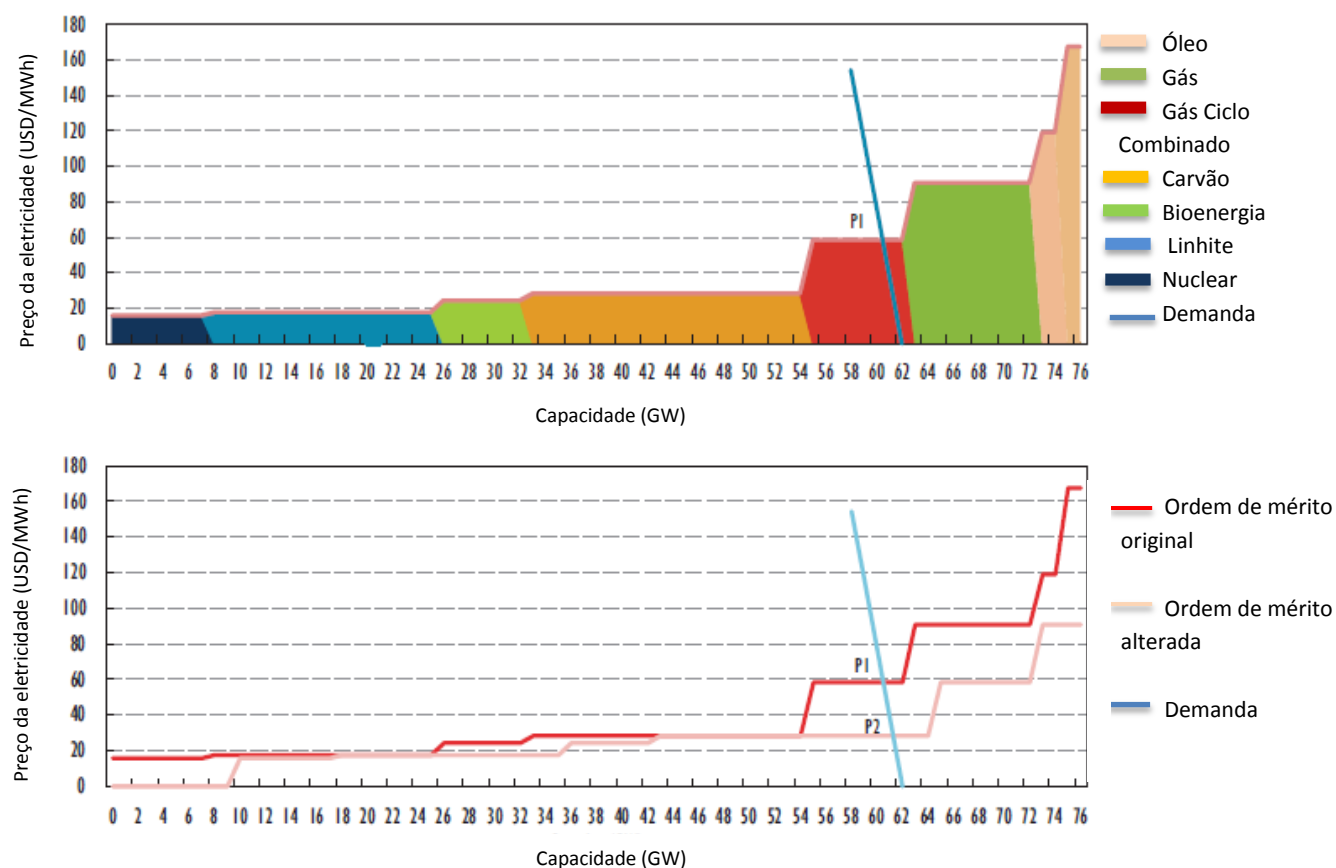
De acordo com Fernandes (2013), na medida em que as renováveis consistem em fontes variáveis de energia, estando sua capacidade de produção subordinada à disponibilidade do fator energético primário, sua maior integração resulta na necessidade de adaptação do sistema elétrico como um todo, posto que a volatilidade inerente a essas fontes pode ter impacto negativo na confiabilidade e na segurança do abastecimento de energia elétrica. Montgomery (2013b) destaca que atualmente os sistemas elétricos enfrentam crescentes níveis de imprevisibilidade, associados tanto à demanda quanto à oferta, que não são facilmente gerenciáveis. As alternativas que se colocam consistem basicamente em investir em excesso de geração, de modo a eliminar a possibilidade de escassez de oferta, ou encontrar soluções que permitam melhor ajuste entre oferta e demanda.

A Agência Internacional de Energia (2014c) ressalta, no entanto, que quando as ERV têm reduzido percentual de participação na geração de eletricidade, sua variabilidade e incerteza seriam inferiores a incerteza associada à demanda de energia, por exemplo. A influência das renováveis variáveis nesse sentido seria significativa apenas a partir de um nível de participação anual entre dois e três por cento.

O impacto da introdução das ERV vai variar de acordo com as características do sistema em que se inserem. Em sistemas dinâmicos, que apresentam demanda crescente de eletricidade e/ou necessidade de substituição da infraestrutura, a integração de maiores parcelas de fontes renováveis tende a ser mais simples em comparação a sistemas estáveis, onde a capacidade adicional de geração a partir das ERV só é possível em detrimento dos operadores já estabelecidos. Isso acontece basicamente em função do baixo custo marginal da geração renovável e do direito de despacho prioritário geralmente concedido a esses geradores, o que resulta na garantia de despacho por ordem de mérito de custo (forma de determinação do despacho a partir do ranqueamento das centrais de geração com base em seu custo de operação de curto prazo). Deste modo, há uma tendência à redução do preço médio da eletricidade quando as ERV estão gerando (“efeito ordem de mérito”, ilustrado na Figura 4) associado à progressiva redução da participação das plantas não renováveis no mix de geração (“efeito utilização”), que atinge inicialmente as plantas mais flexíveis (como térmicas à gás e à diesel, que podem ser rapidamente iniciadas e logo atingem sua capacidade máxima de geração), e com o avanço da integração das ERV passa a afetar também os geradores menos flexíveis, com vocação para gerar na base (incluído as usinas nucleares e à carvão, cuja operação não é flexível). A associação desses dois efeitos pode ter impacto negativo na saúde financeira dos geradores não renováveis, o que caracteriza um desafio a ser enfrentado principalmente nos sistemas estáveis. Além disso, em sistemas dinâmicos, que requerem

constante expansão dos investimentos, o emprego de estratégias alinhadas com o objetivo de integração das renováveis é mais viável. Logo, em países como China, Brasil e Índia, que são exemplos de sistemas dinâmicos, a geração a partir das fontes renováveis variáveis pode ser uma boa solução para atender a demanda crescente (AIE, 2014c).

**Figura 4: Ilustração do Efeito Ordem de Mérito**



Notas: P1 = preço sem geração adicional; P2 = preço com geração adicional.

Fonte: AIE, 2014c

Destaca-se, ainda, que o impacto da incerteza decorrente da introdução das ERV vai depender muito da capacidade do operador de fazer previsões acerca da “incidência” dessas fontes, com base nas informações disponíveis, e da forma como essas previsões serão utilizadas na operação do sistema (AIE, 2014c). De acordo com Bullis (2014), as previsões têm contribuído para que as empresas de eletricidade mitiguem um dos principais desafios associados à energia eólica, a intermitência. Fernandes (2013, P.43) defende que “uma boa previsão é também uma medida fundamental para se ultrapassar este problema da intermitência, uma vez que permite fazer a ponte da produção a partir de fontes de energia renováveis com a produção das centrais convencionais e a previsão do consumo [...]”. Assim,

a melhoria da capacidade de previsão é uma forma de aumentar a previsibilidade dos sistemas e reduzir, paralelamente, o custo da flexibilidade.

Deste modo, dentre os desafios relacionados à expansão das fontes renováveis variáveis se destacam o risco e a incerteza associados à intermitência, o fato de não consistirem em fontes capazes de operar na base de geração de eletricidade, não podendo fornecer capacidade firme, e por fim, o fato do pico de geração a partir das renováveis não necessariamente coincidir com o pico de demanda (MONTGOMERY, 2013a). A associação desses fatores resulta num contexto de crescente imprevisibilidade dos sistemas elétricos.

Os operadores do sistema se deparam com duas diferentes situações: quando a demanda excede a oferta total, podem usar a capacidade de back-up ou reduzir a demanda; quando o produto da geração das energias renováveis variáveis exceder a demanda imediata, podem restringir o insumo das ERV ou buscar meios de aumentar a demanda. (AIE, 2014a, P.241)

Nesse contexto de transformação dos sistemas, para que o aumento da participação das renováveis variáveis e sua respectiva integração aos sistemas elétricos logre êxito, é necessária a atuação em três frentes: implantação das ERV de forma favorável ao sistema como um todo; promoção de um melhor aproveitamento dos recursos já disponíveis, aperfeiçoando a operação do sistema; e, por fim, investir em soluções capazes de adicionar flexibilidade ao sistema (EIA, 2014c).

Agregar a produção por extensas regiões geográficas e empregar um mix de geração eólica e solar fotovoltaica reduz a variabilidade consideravelmente. Infraestrutura de rede adicional ou o melhor uso da infraestrutura existente pode ser exigido para atingir esse objetivo. No entanto, mesmo agregando as ERV em escala continental, certo grau de variabilidade permanece. (tradução nossa) (AIE, 2014c, P.27).

O aumento da participação das ERV na matriz de geração implicaria, portanto, em maiores níveis de imprevisibilidade e de incerteza nos sistemas elétricos, do que resulta uma maior demanda por flexibilidade. No limite, é possível afirmar que o nível de participação das fontes renováveis variáveis na matriz elétrica dependerá diretamente da flexibilidade dos sistemas. “O grande desafio das fontes renováveis é exatamente a construção dessa flexibilidade, dessa liquidez, de tal forma a permitir a substituição em grande escala dos combustíveis fósseis sem a alteração do padrão de consumo de energia tradicional.” (BICALHO, 2011).

A chave para integração das ERV é a flexibilidade. Em seu sentido mais amplo, a flexibilidade do sistema elétrico descreve em que medida um sistema pode adaptar os padrões de geração e consumo de eletricidade com o objetivo de manter o equilíbrio entre oferta e demanda de modo efetivo em termos de custo. [...] Flexibilidade expressa a capacidade de um sistema elétrico de manter a continuidade dos serviços frente a rápidas e grandes

oscilações na oferta e na demanda, independente da causa. (tradução nossa) (AIE, 2014c, P.23)

Deste modo, duas alternativas se apresentam: a construção de parques geradores com capacidade de atender os picos de carga que ocorrem em ocasiões relativamente raras, ou seja, construção de sobre capacidade, ao que se associam os custos de manutenção de sistemas de back-up que operam, necessariamente, com determinado grau de ociosidade; ou, por outro lado, o investimento em soluções capazes de conferir maior flexibilidade ao sistema e que reduzam, simultaneamente, a necessidade de construção de sobre capacidade, de modo a viabilizar a integração das renováveis de forma mais eficiente em termos de custos.

Hallack e Vazquez (2014) chamam atenção para uma importante característica operacional das fontes renováveis variáveis: a “incapacidade de gerenciar a produção”, posto que a geração de eletricidade se dá quando há disponibilidade do recurso primário, disponibilidade esta que não é passível de influência dos agentes, que se dedicam, portanto, a prever a produção no sentido de viabilizar a organização prévia da operação do mercado elétrico. A baixa precisão das previsões, no entanto, implica na necessidade de ajustes em horizontes muito curtos, que podem chegar a poucas horas. Não são todas as plantas térmicas, no entanto, que possuem a capacidade de entrar em operação em prazos tão reduzidos, a exemplo das térmicas a carvão e nucleares. Disto decorre a necessidade de algum nível de estocagem elétrica, de modo a aumentar a capacidade de resposta do sistema, fazendo face ao “deslocamento do mercado elétrico para prazos cada vez mais curtos”.

Fernandes (2013) coloca que a variabilidade dos recursos renováveis requer o investimento em soluções tecnológicas com capacidade de entrar na rede em prazos curtíssimos, garantindo o fornecimento de energia elétrica em situações de suspensão imprevista da geração a partir das ERV. Ferraz (2012) reitera que “[...] perante volumes maiores de intermitência é preciso que o sistema tenha reserva suficiente para fazer face àqueles períodos em que a geração de origem intermitente não venha a ocorrer no volume esperado [...]”.

Neste cenário, quatro fontes de flexibilidade ganham destaque: a estocagem de energia, a integração pelo lado da demanda, a expansão e modernização da infraestrutura da rede e a geração térmica despachável (AIE, 2014c). No capítulo dois cada uma dessas alternativas será devidamente apresentada, levando em consideração as tecnologias disponíveis, as vantagens relacionadas à sua implementação e os desafios e barreiras à sua difusão.

A estocagem de energia figura, portanto, como uma dessas soluções, capazes de prover a flexibilidade necessária aos sistemas elétricos, e atua no sentido de injetar mais liquidez no sistema, posto que viabiliza a obtenção de energia quando, onde e no volume necessário.

A estocagem engloba as tecnologias capazes de absorver energia elétrica em um determinado momento e retornar energia elétrica posteriormente, e são caracterizadas de acordo com o princípio que exploram para armazenar energia, o tempo de resposta, duração da carga e intervalo de descarga, e sua escala e localização no sistema elétrico (AIE, 2014c). Montgomery (2013b) destaca que:

Um dos maiores problemas com a energia renovável é que a velocidade com que ela consegue aumentar e diminuir – conforme nuvens obscurecem o sol ou o vento diminui – pode ser muito mais rápido do que as usinas convencionais conseguem mudar sua produção para compensar. Mas mesmo pequenas baterias podem responder a essas mudanças quase que instantaneamente.

A estocagem de energia também pode ser aplicada em sistemas isolados da rede, como em pequenos sistemas domésticos alimentados por painéis fotovoltaicos, facilitando o acesso à energia elétrica e reduzindo os custos associados à conexão de áreas remotas a infraestrutura de transmissão e distribuição de eletricidade, podendo exercer um importante papel no que tange aos esforços internacionais de viabilizar o acesso à energia ao redor mundo, sobretudo nos países subdesenvolvidos (AIE, 2014a).

Entretanto, embora a estocagem possa desempenhar papel chave nesse processo de descarbonização dos sistemas elétricos, há algumas barreiras à sua difusão. Um dos maiores problemas relacionados às tecnologias de estocagem consiste nos altos custos relacionados ao uso dessas tecnologias, em comparação com as tecnologias concorrentes, e o seu baixo desempenho. “Atualmente, o desempenho das tecnologias de estocagem é muito baixa e os custos da estocagem de eletricidade são muito altos para que sejam introduzidas em larga escala de forma bem sucedida no setor elétrico [...]” (AIE, 2014a, P.241).

## **CAPÍTULO II– SOBRE AS FONTES DE FLEXIBILIDADE DO SETOR ELÉTRICO**

De acordo com o MIT (2011), diante da introdução dos recursos variáveis de energia, é necessário que o sistema elétrico tenha suficiente capacidade de resposta, através de interconexões, resposta da demanda, estocagem e *backup* da oferta, no sentido de manter os mesmos padrões de confiabilidade. Neste capítulo trataremos, portanto, das principais fontes de flexibilidade disponíveis: a estocagem de energia, a integração pelo lado da demanda, a expansão e modernização da infraestrutura da rede e a geração térmica despachável.

### ***II.1. As soluções tradicionais***

Trataremos por soluções tradicionais aquelas que envolvem sobre capacidade, seja de geração ou de transporte, resultando em ociosidade do capital. São elas: a geração térmica despachável e a expansão e modernização da infraestrutura de rede.

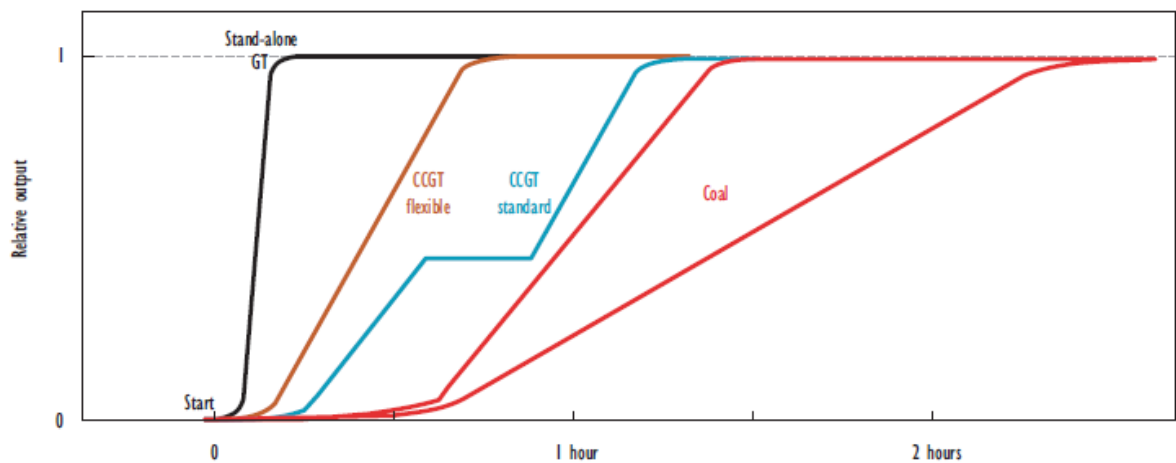
#### ***II.1.1. A geração térmica despachável***

A geração térmica despachável consiste na geração a partir de fontes renováveis firmes, como o biogás e a biomassa sólida, e de fontes não renováveis despacháveis, a exemplo da nuclear e do carvão, e atualmente responde pela maior parte da geração de energia nos sistemas elétricos. No contexto de integração das ERV, no entanto, o papel da geração despachável tende a se alterar, de modo que sua participação no *mix* de geração tende a se reduzir, enquanto seu papel como fonte de flexibilidade tende a ser reforçado (AIE, 2014c).

Embora todas as tecnologias de geração térmica despacháveis sejam consideradas eficientes fontes de flexibilidade, sua capacidade de resposta a eventos inesperados de variação da carga vai depender da velocidade de alteração do seu nível de produção (tempo de *ramping*), dos níveis de produção possíveis (capacidade de ajuste), e do tempo necessário para a entrada da planta em operação. As térmicas inflexíveis, a exemplo das nucleares,

demandam muito tempo para entrarem em operação e não costumam passar por operações de ajuste do nível de produção, o que as torna adequadas para geração na base. Já as tecnologias de geração flexível, como a biomassa e o biogás, apresentam rápida capacidade de reposta, que só vai ser superada pelas plantas com elevada flexibilidade, a exemplo das hidroelétricas sem bombeamento, que operam com os menores tempos de resposta (em todos os parâmetros considerados) e cujo custo de operação costuma ser bastante reduzido. Na Figura 5 é estabelecida uma comparação entre o tempo que diferentes térmicas levam para atingir sua plena capacidade de geração, a partir do momento que entram em operação. Em geral, quanto maior a capacidade de resposta da térmica maior sua contribuição para redução da incerteza.

**Figura 5: Comparação entre o tempo de *ramping* de diferentes tecnologias**



Source: VDE, 2012.

### ***II.1.2. Expansão e modernização da infraestrutura de rede***

As fontes de energia renovável variáveis apresentam duas características especialmente desafiadoras para os sistemas de transmissão: a variabilidade da produção e o fato dos melhores recursos normalmente estarem disponíveis em locais distantes dos principais centros de carga, e respectivamente, distantes dos sistemas de transmissão instalados (MIT, 2011).

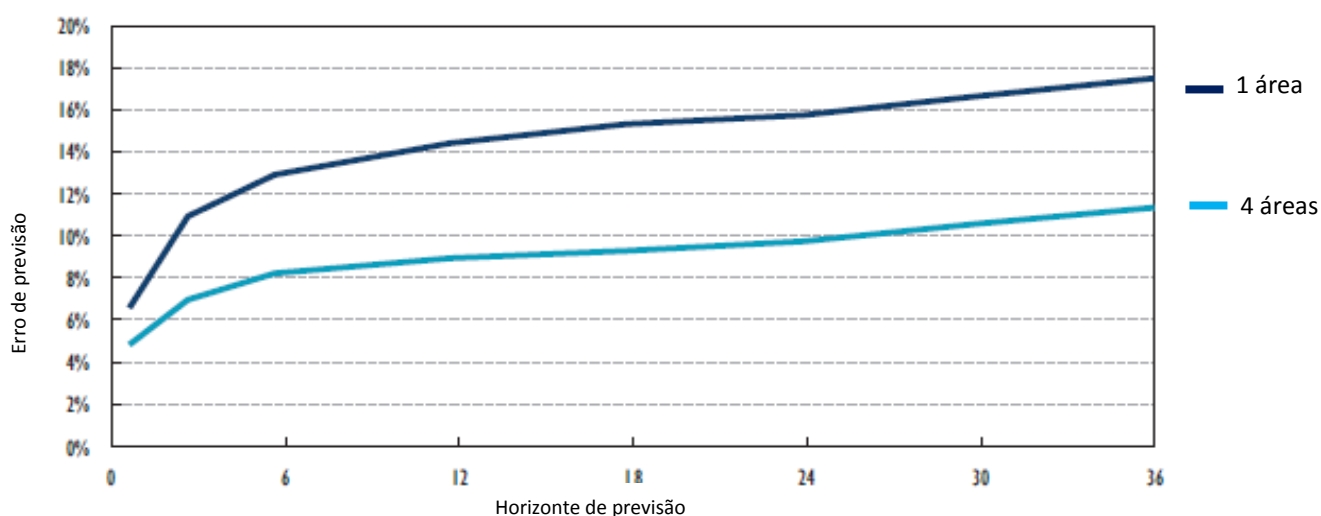
Os principais componentes das infraestruturas de rede são as redes de transmissão de alta voltagem, a linhas do sistema de distribuição e alguns equipamentos como os transformadores, englobando, portanto, todos os ativos que conectam a geração à demanda,

sendo capaz de agregar recursos distantes e assim viabilizar a exploração de importantes economias de escala e de escopo, que beneficiam o sistema elétrico como um todo.

Através da expansão da infraestrutura e respectiva conexão de plantas de geração renovável geograficamente dispersas, as variações da produção são suavizadas, na medida em que as características climáticas de cada região interligada à rede variam, de modo que a redução da disponibilidade de determinada fonte renovável em uma área pode ser compensada pelo aumento de sua disponibilidade em outra região. Deste modo, a expansão da rede contribui para a redução da variabilidade da geração (AIE, 2014c; MIT, 2011).

Outra importante contribuição dos investimentos em infraestrutura consiste na redução da incerteza característica das ERV, pois através da interligação de áreas progressivamente mais abrangentes, os erros de previsão são sensivelmente reduzidos, dado que no agregado os erros de previsão para cima ou para baixo acabam se compensando. A Figura 6 mostra esse efeito.

**Figura 6: Erro de previsão absoluto como percentual da capacidade de geração eólica na Finlândia em 2004**



Source: Holttinen et al., 2006.

Fonte: AIE (2014c)

## ***II.2- A integração pelo lado da demanda***

Segundo o MIT (2011), a capacidade de resposta da demanda pode contribuir para o aumento da eficiência do sistema e redução dos custos associados à manutenção do equilíbrio entre a oferta e a demanda, na medida em que em sistemas nos quais a resposta da demanda é



confiável e suficientemente rápida, a redução do consumo em resposta ao aumento do preço da energia em horários de pico (quando o sistema opera com elevado nível de utilização da capacidade), por exemplo, contribui para regularizar a curva de carga e minimizar a necessidade de investimento em sobre capacidade de geração e de transmissão, de modo que o investimento em políticas de integração a partir da demanda pode substituir fontes de flexibilidade mais capital intensivas, ou seja, que requerem maiores volumes de investimento.

Deste modo, a integração pelo lado da demanda promete ser uma fonte de flexibilidade efetiva em termos de custo, e é definida como a combinação de políticas de controle ou gestão da carga e de políticas baseadas na resposta da demanda. As políticas de controle e gestão da demanda (“programas despacháveis”) englobam medidas que visam promover, sobretudo, amortecimento dos picos de demanda e garantia da segurança energética em situações emergenciais; as medidas de resposta da demanda (“programas reativos”), por sua vez, se baseiam em reações voluntárias dos consumidores a sinais emitidos pelo(s) operador(es) do sistema, e normalmente envolvem variações no preço da eletricidade (AIE, 2014c; MIT, 2011).

No que diz respeito às políticas de controle e gestão da carga, envolvem medidas de controle direto da carga, programas emergenciais e tarifas interruptíveis. Nos programas de controle direto os aparelhos elétricos utilizados pelos consumidores são diretamente controlados pelo operador da rede ou pelo fornecedor de eletricidade. O consumo residencial consiste em seu principal alvo, com ênfase para os aquecedores elétricos de água e aparelhos de ar-condicionado, que costumam responder por majoritária parte dos picos de carga nos sistemas. Já os programas emergenciais passam pela concessão de incentivos monetários para consumidores que reduzirem seu consumo em situações de ameaça à confiabilidade do abastecimento, de modo que é estabelecida uma tarifa a ser paga por cada unidade de energia que deixa de ser consumida. As tarifas interruptíveis, por outro lado, tem como foco “[...] grandes consumidores comerciais e industriais, que recebem uma taxa de desconto ou crédito para reduzirem o consumo durante emergências declaradas.” (tradução nossa) (MIT, 2011: 152).

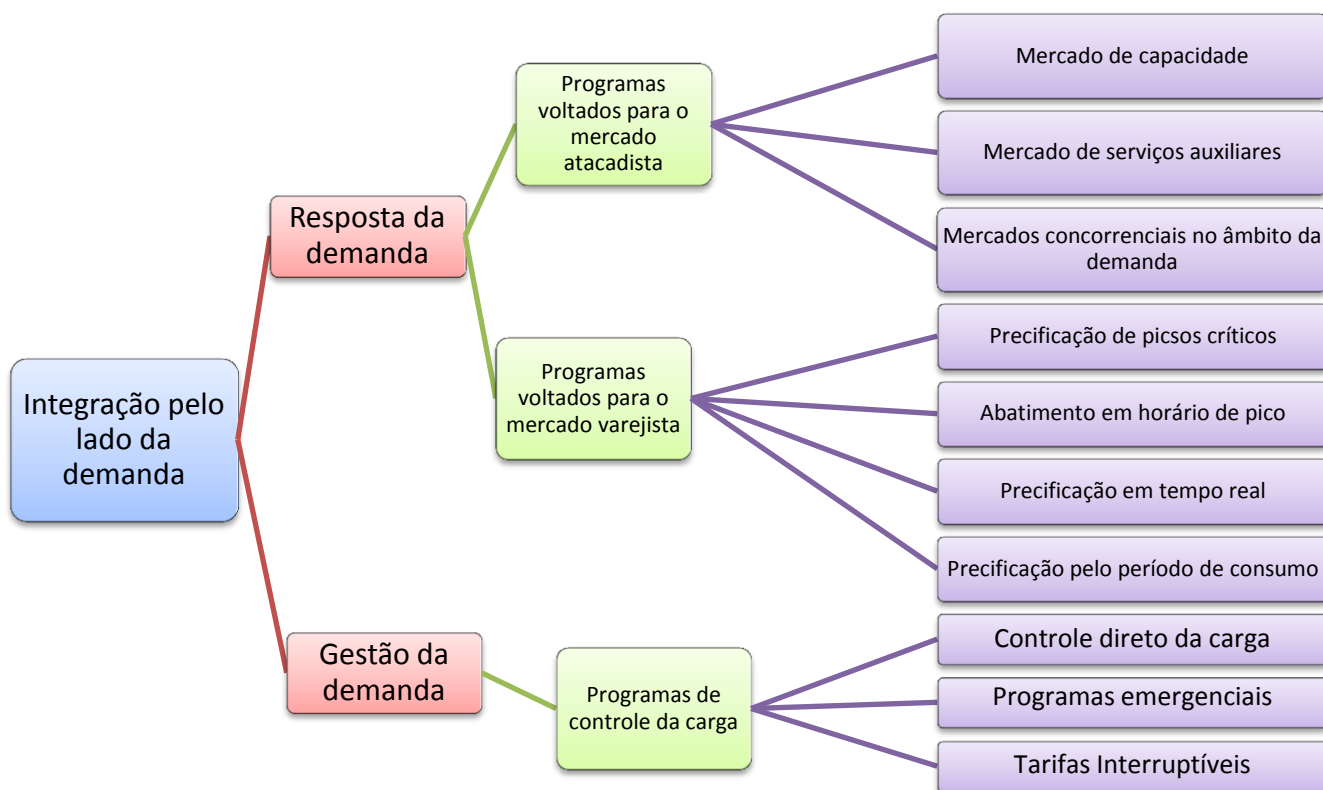
Já as políticas de resposta da demanda podem ser voltadas para o mercado atacadista de energia elétrica ou para o mercado varejista. Os programas voltados para o mercado atacadista podem ter como foco: o incentivo ao comprometimento com metas de redução da carga no longo prazo, o que se apresenta como alternativa à necessidade de expansão da capacidade de geração do sistema; o estímulo à redução do consumo no curto prazo (no

horizonte de horas ou, no máximo de um dia), mediante variações do preço da energia elétrica negociada no mercado de curto prazo, que sinalizam situações de escassez ou excesso de oferta de energia, de modo a “[...] respeitar restrições à geração ou à confiabilidade e a minimizar os custos operacionais.” (tradução nossa) (HIRST, 2002, P.8) e ainda garantir o equilíbrio entre oferta e demanda em tempo real, através da oferta de reservas circulantes, reservas não-circulantes, ou do serviço de regulação da frequência em um mercado de serviços auxiliares. De acordo com Prada (1999, P.49) reserva circulante pode ser definida como “[...] a capacidade ociosa de unidades que não estão despachando à plena capacidade ou de unidades conectadas à rede, mas que não estão fornecendo qualquer carga.” (tradução nossa), enquanto o contingente de reserva não circulante consiste na capacidade de geração a partir de plantas com rápida entrada em operação, como as térmicas a gás e as usinas hidroelétricas.

As políticas voltadas para a resposta da demanda no mercado varejista de eletricidade, por fim, se baseiam no princípio de adequação do perfil de consumo de eletricidade ao custo de oportunidade de uso da mesma, e envolvem basicamente os seguintes mecanismos de determinação de preços: precificação em tempo real, em que o preço sofre alterações constantes no sentido de refletir variações no custo marginal da energia; precificação de acordo com o período do dia em que se dá o consumo de energia, precificação de picos críticos e abatimentos em horários de pico de demanda.

Na Figura 7 os diferentes mecanismos de integração pelo lado da demanda encontram-se esquematizados.

**Figura 7: Tipos de programa de integração pelo lado da demanda**



Fonte: MIT, 2011

A Agência Internacional de Energia (2014c) aponta que esses programas contribuem para a integração das energias renováveis variáveis a partir da redução dos impactos da incerteza, dada sua capacidade de criar reservas operacionais (compostas pelas reservas circulantes e não-circulantes), e da variabilidade, pois são capazes de induzir a redução do consumo de eletricidade em período de baixa produção das ERV, e de amenizar a variabilidade da carga através do deslocamento da demanda de períodos de pico para os períodos de declínio da carga. Além disso, as medidas de integração pelo lado da demanda podem ser cruciais para mitigar possíveis problemas associados à geração distribuída, com destaque para os sistemas baseados na geração solar fotovoltaica, na medida em que podem direcionar a demanda local para os momentos de maior incidência dos raios solares.

### ***II.3- Tecnologias de estocagem de energia***

As tecnologias de estocagem de energia podem ser definidas em termos da forma de saída da energia estocada, de modo que se dividem em tecnologias de armazenamento de

eletricidade, que são definidas como tecnologias capazes de converter a eletricidade em determinada forma (química, potencial, cinética, entre outras) que possa ser armazenada e posteriormente reconvertida em eletricidade, de modo a viabilizar a geração de energia extra em períodos de demanda reduzida e injeção dessa eletricidade estocada na rede em períodos de pico de demanda; e tecnologias de estocagem térmica, que consistem em sistemas que armazenam energia para posterior conversão em capacidade de aquecimento ou resfriamento (MGI, 2013; AIE, 2014a; AIE, 2014c). Neste trabalho focaremos na análise das tecnologias de estocagem de eletricidade.

Uma das principais vantagens da estocagem consiste na sua capacidade de atuar tanto como fonte de geração de energia quanto como fonte de demanda de eletricidade, de modo a absorver energia durante picos de geração e retornar essa energia em períodos de pico de demanda, sendo capazes de entregar modularidade, controlabilidade e capacidade de resposta (AIE, 2014a).

Hallack e Vazquez (2013) destacam que “[...] a introdução massiva de produção eólica, e as grandes necessidades de resposta muito rápidas associadas a esta, gerou a necessidade de dispor, em alguma medida, de estocagem elétrica para complementar o sistema de forma mais segura e econômica.”. Argumenta-se, assim, que “[O] verdadeiro custo da energia renovável, até certo ponto, depende de quanto o armazenamento de energia é necessário.” (BULLIS, 2013).

De acordo com Montgomery (2013a), atualmente a grande questão relacionada às tecnologias de estocagem diz respeito ao *trade-off* existente entre a construção de sobre capacidade de geração de energia e o investimento na ampliação da capacidade de estocagem dos sistemas, de modo que devido aos elevados custos dessas tecnologias, a solução alternativa (expansão da geração) é mais atrativa em termos econômicos. Ele argumenta, no entanto, que com a redução do custo da estocagem, e a melhor compreensão acerca das externalidades negativas associadas à construção de sobre capacidade de geração (como os impactos ambientais, por exemplo), a tendência é que se recorra cada vez mais à estocagem como meio de assegurar a segurança e a confiabilidade do suprimento de energia.

As tecnologias de estocagem são capazes de absorver energia e a armazenar por um determinado período, de modo a viabilizar a integração temporal e geográfica da oferta e da demanda de eletricidade. Há diversas possibilidades de aplicação dessas tecnologias, com destaque para<sup>1</sup>:

---

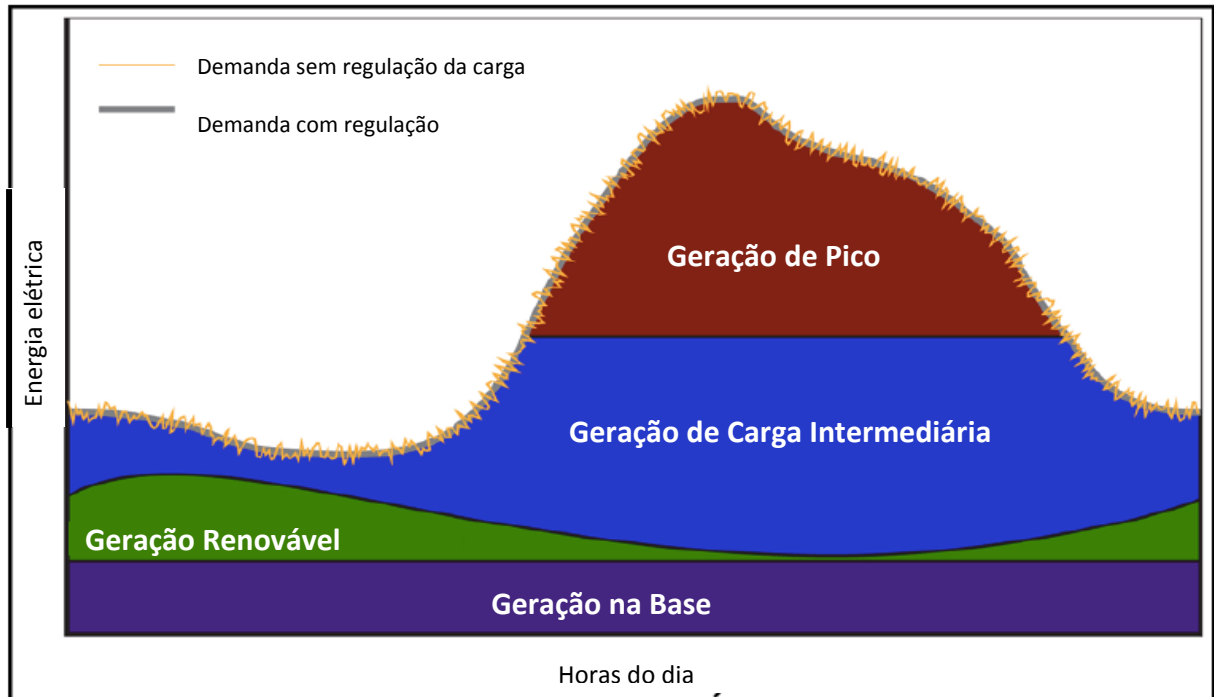
<sup>1</sup> Extraído de: DOE (2013), AIE (2014a; 2014b; 2014c) e MGI (2013)

- *Estocagem sazonal: a disponibilidade dos recursos renováveis pode variar ao longo do ano, de modo que pode haver períodos em que a geração de ERV é interrompida. No norte da Europa, por exemplo, a incidência de radiação solar é maior no verão e na primavera, e mais escassa no inverno, estação marcada pelos maiores níveis de consumo de energia (principalmente para aquecimento e iluminação). Deste modo, através da estocagem é possível manter o fornecimento de energia nos períodos de reduzida disponibilidade dos recursos renováveis sem que isso implique na elevação das emissões de carbonos;*
- *Arbitragem: envolve a compra de energia em períodos de baixa demanda, e consequentemente preços reduzidos, para carregar os sistemas de estocagem, e posterior venda em momentos de alta da demanda, quando os preços se elevam consideravelmente. A arbitragem também pode estar associada ao armazenamento do excesso de energia gerada a partir das fontes renováveis, que na ausência dos sistemas de estocagem seria cortada;*
- *Regulação de frequência: serviço de balanceamento contínuo das flutuações da oferta e da demanda em uma área de controle sob condições normais, com o objetivo de evitar instabilidades. Em sistemas de geração de energia solar, uma redução momentânea da carga, devido a passagem de uma nuvem, por exemplo, resulta no aumento da frequência, e consecutiva necessidade de regulação. Normalmente a regulação é feita de forma automática através das plantas de geração. O efeito da regulação da frequência é demonstrado na Figura 8;*
- *Acompanhamento da carga: ainda considerando variações do sistema em condições normais, o acompanhamento da carga é o segundo serviço de balanceamento contínuo, e administra flutuações do sistema em um tempo limite que pode variar entre 15 minutos e 24 horas, podendo ser controlado automática ou manualmente;*
- *Suporte de tensão: consiste na injeção ou absorção de energia reativa no sentido de manter os níveis de tensão nas redes de transmissão e distribuição em condições normais. Esse serviço pode ser desempenhado por plantas de geração térmica ou por equipamentos específicos de transmissão e distribuição, como os capacitores e indutores, por exemplo;*
- *Capacidade de arranque autônomo: em situações de colapso do sistema elétrico e de falha de todos os serviços auxiliares, os recursos de arranque autônomo permitem que a geração de energia seja retomada por si só, sem que seja recorrer à rede, e então injetar eletricidade na rede e nos demais geradores. Cabe ressaltar que o uso de ativos de arranque autônomo é raro, na medida em que situações de colapso total*

*do sistema são igualmente raras. Deste modo, poderia ser um serviço secundário desempenhado pela estocagem;*

- *Adiamento de investimento em infraestrutura: o armazenamento de energia pode adiar a necessidade construção de capacidade de transmissão e distribuição de eletricidade, posto que em casos onde a carga de pico excede a capacidade da rede, sistemas de estocagem podem ser instalados na rede de transmissão, próximo à área onde é detectada a carga excedente, e assim acomodar os picos de demanda;*
- *Suporte a sistemas não conectados à rede: os painéis de geração fotovoltaica consistem em uma alternativa economicamente viável e limpa para levar eletricidade a consumidores não conectados à rede. A estocagem é necessária nesses casos no sentido de garantir a possibilidade de consumo de energia mesmo em períodos em que não há incidência solar;*
- *Integração dos recursos variáveis de energia: a aplicação das tecnologias de estocagem associadas à geração a partir de fontes renováveis variáveis pode aumentar o valor e a qualidade das VER, posto que contribui para mitigar os desafios associados às variações abruptas e sazonais da geração, e para superar as lacunas temporais e geográficas entre oferta e demanda;*
- *Atuação como reservas circulantes e não-circulantes: a manutenção de capacidade de reserva é essencial para garantir o equilíbrio do sistema em momentos de perda inesperada de recursos de geração. As reservas são classificadas como circulantes e não-circulantes de acordo com seu tempo de resposta (menos que 15 minutos e mais que 15 minutos, respectivamente). Os sistemas de estocagem utilizados para capacidade de reserva têm que estar sempre prontos e disponíveis para serem descarregados quando necessário.*

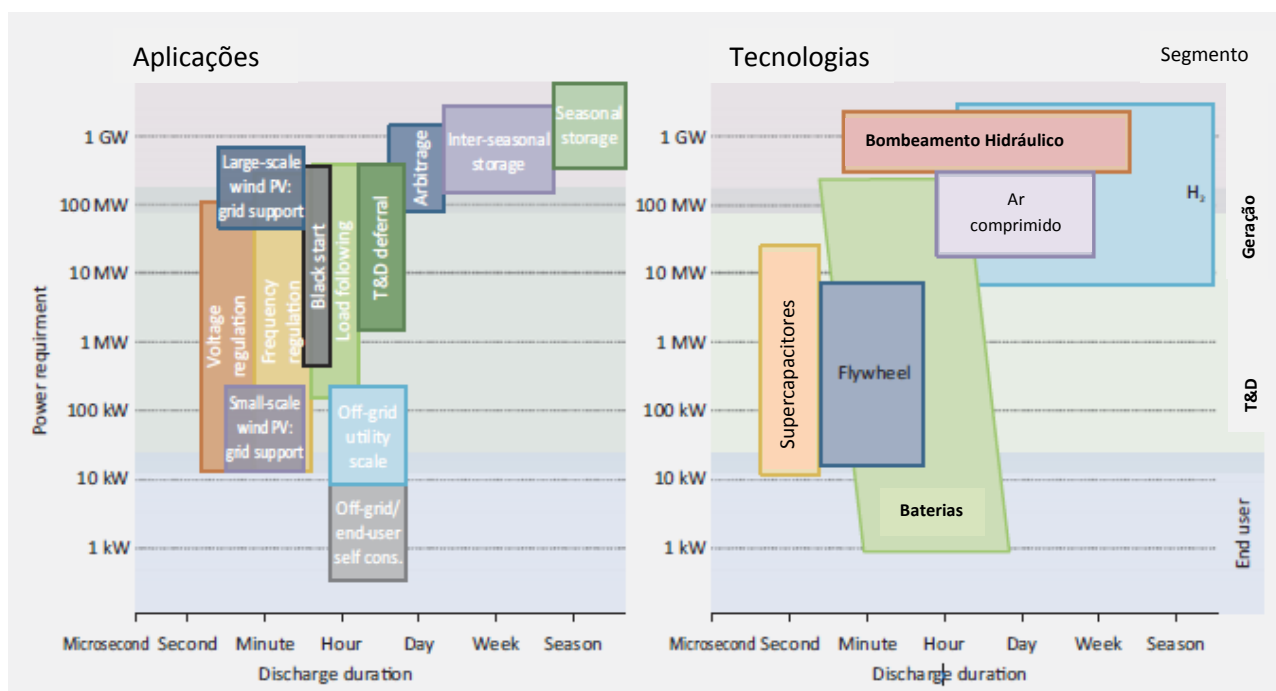
**Figura 8: Carga do sistema com e sem regulação**



Fonte: DOE 2013

A vocação de determinada tecnologia de estocagem para cada uma das aplicações consideradas vai depender de parâmetros técnicos. Para a estocagem de eletricidade os seguintes critérios devem ser levados em conta: período de descarga, tempo de resposta e potência. Já no que tange ao armazenamento térmico, os seguintes parâmetros são considerados: capacidade e temperatura de armazenamento (Hauer et al. 2013 *apud* AIE 2014b). A Figura 9 representa as principais aplicações da estocagem em termos do tempo de descarga e da capacidade das tecnologias.

**Figura 9: Aplicações das tecnologias de estocagem em termos de tempo de descarga e capacidade**

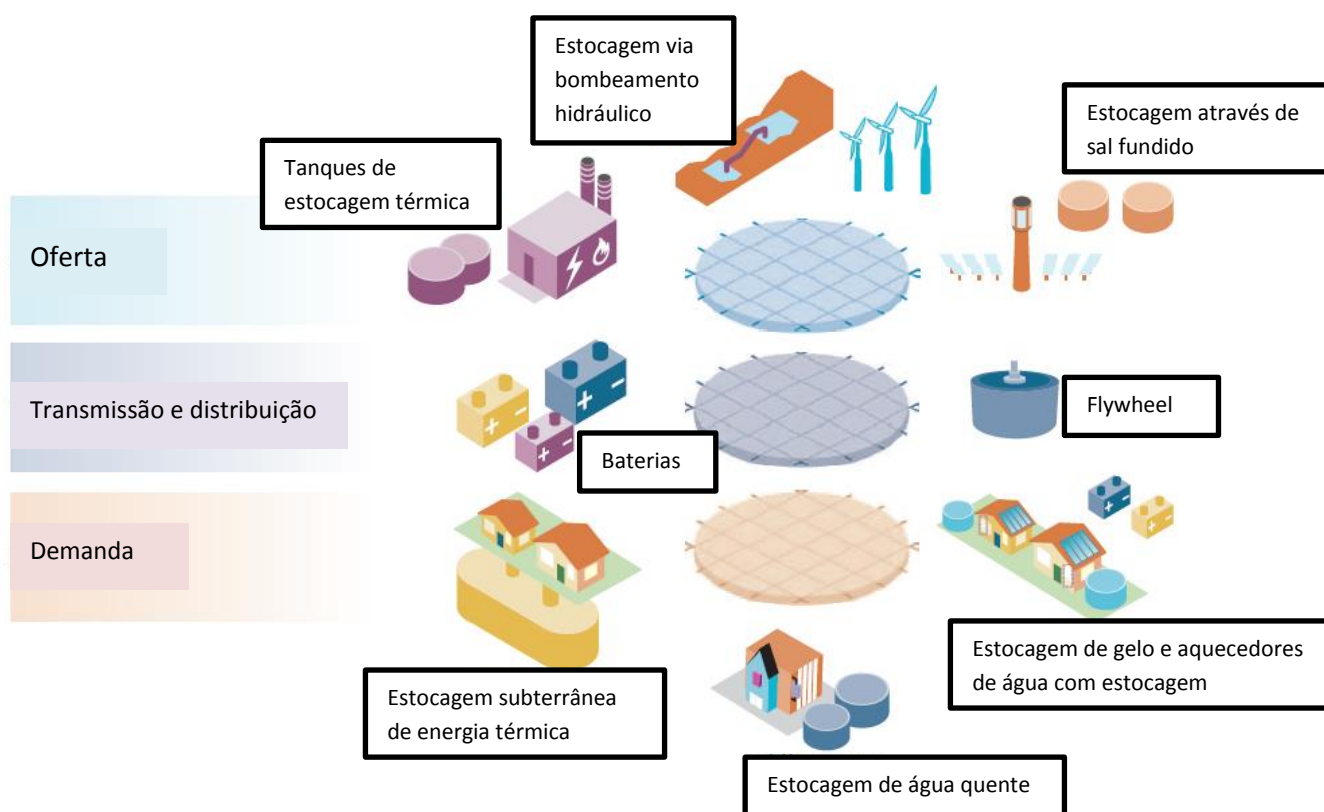


Fonte: AIE, 2014a.

A estocagem de energia pode ser instalada em qualquer parte do sistema elétrico, ou seja, no nível da oferta, da transmissão e distribuição, ou do consumo final, e pode ser utilizada de forma centralizada ou distribuída, em maior ou menor escala (AIE, 2014b). O armazenamento distribuído engloba sistemas com capacidade de estocagem que varia entre 100 W e 10 MW, que normalmente são instalados próximo aos centros de carga ou às fontes de recursos renováveis, e conectados as redes de baixa e média tensão. Alguns dos objetivos da estocagem distribuída são promover maior e mais eficiente integração das ERV no nível da geração distribuída e fornecer back-up local de energia. Já o armazenamento centralizado se refere a sistemas com capacidade acima de 10 MW, conectados a rede de transmissão de eletricidade; a instalação de soluções de estocagem centralizada costuma servir aos objetivos de acompanhamento da carga, arbitragem de preços e provisão de reservas operacionais (EIA, 2014c). A Figura 10 contém um sistema elétrico hipotético que conta com estocagem através de diferentes tecnologias em todos os seus níveis.



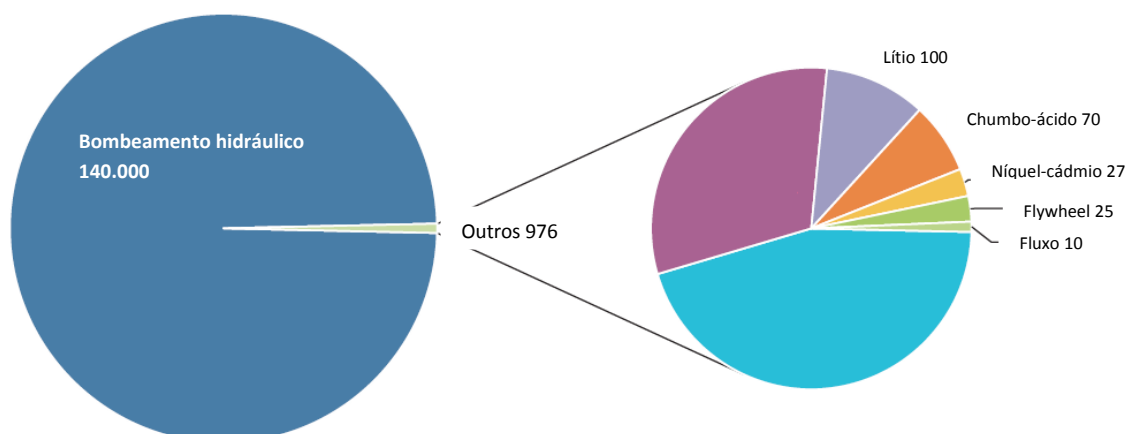
**Figura 10: Aplicações dos ativos de estocagem ao longo de um sistema elétrico hipotético**



Fonte: AIE, 2014 b

Atualmente, cerca de 3% a 4% da eletricidade gerada pelas plantas ao redor do mundo é estocada (Manyika *et al.*, 2013). A tecnologia mais utilizada para a estocagem de energia é o bombeamento hidráulico, uma tecnologia madura que responde por cerca de 99% da atual capacidade instalada de estocagem global (Figura 11). Consiste em uma tecnologia de estocagem mecânica, ou seja, se baseia no armazenamento a partir da conversão de eletricidade em energia mecânica ou potencial (AIE, 2014c). Esse sistema funciona a partir do bombeamento de água de um reservatório para outro, localizado a montante, em períodos de excesso de oferta de energia; quando necessário, a água é escoada para o reservatório a jusante, acionando uma turbina hidráulica que então injeta a energia gerada na rede. O bombeamento hidráulico tem capacidade de resposta na ordem de segundos a minutos e permite a estocagem de quantidades significativas de energia. A principal desvantagem associada a essa tecnologia consiste no fato de requerer que a área de instalação atenda a condições muito específicas em termos de topologia, disponibilidade de água e distância da demanda.

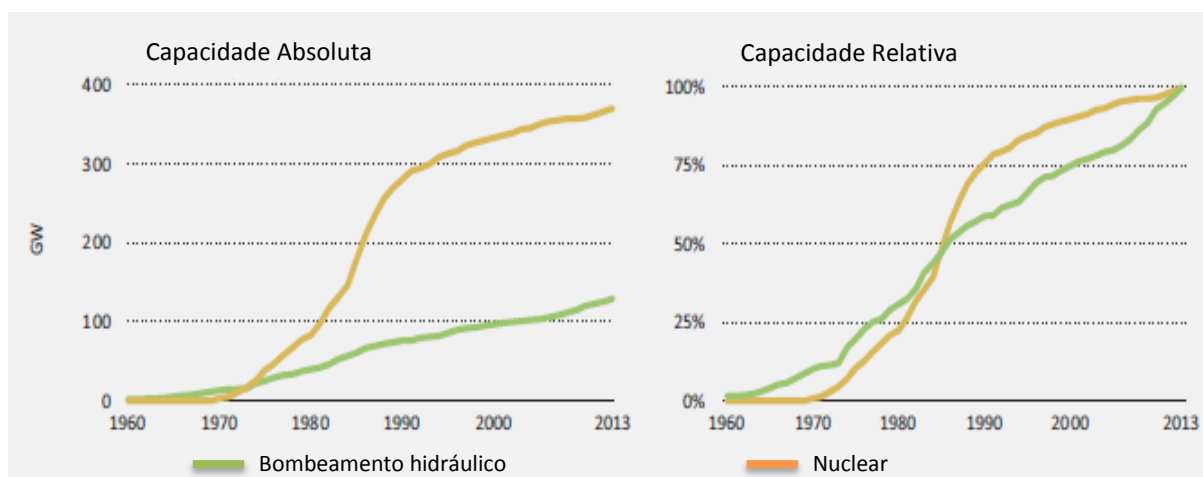
**Figura 11: Atual capacidade global de estocagem de energia conectada à rede (MW)**



Fonte: AIE, 2014b

A predominante participação da estocagem via bombeamento hidráulico guarda estreita relação com o desenvolvimento da capacidade de geração nuclear, que tem origem na década de 70 (Figura 12). Essa associação se deve basicamente à elevada inflexibilidade das plantas nucleares, característica que implica na inviabilidade do ajuste da geração nuclear às constantes variações da demanda. O investimento em sistemas de bombeamento permitia, assim, a arbitragem de preços a partir do armazenamento de eletricidade em períodos de baixa demanda e a posterior venda dessa energia em horários de pico de demanda, quando são praticados preços mais altos (AIE, 2014a).

**Figura 12: Relação entre a capacidade instalada de geração nuclear e a capacidade instalada de armazenamento via bombeamento hidráulico**



Fonte: AIE, 2014a

A segunda tecnologia com maior participação na capacidade global de armazenamento é a estocagem de ar comprimido, que também se baseia no princípio de armazenamento mecânico. A eletricidade é utilizada para comprimir o ar, que é então armazenado em tanques de estocagem ou cavernas. O processo de reconversão é feito através da liberação do ar comprimido, que vai para um combustor em uma turbina a gás para então gerar eletricidade (AIE, 2014b).

Ambas as tecnologias de armazenamento mecânico citadas acima não são aplicáveis em sistemas de estocagem distribuída, e têm seu potencial de expansão limitado por restrições de curto prazo associadas à questão geográfica e aos elevados investimentos iniciais necessários (AIE, 2014c).

As *flywheels* respondem por uma capacidade instalada de 25 MW, e consistem em uma espécie de bateria eletromecânica, composta por uma roda que gira em velocidades muito elevadas, de modo a armazenar energia cinética. A energia armazenada é posteriormente liberada em rápidas rajadas de energia, através da redução da velocidade do rotor (AIE, 2014b; Bitterlu, 1998). Atualmente, as *flywheels* são majoritariamente utilizadas para regulação da frequência (DOE, 2013: 18).

As baterias, por sua vez, são a forma mais conhecida de armazenamento de energia e respondem por uma capacidade de estocagem de 611 MW (cerca de 0,4% da capacidade instalada total). Consistem em sistemas compostos por duas ou mais células eletroquímicas que possibilitam o fluxo de eletricidade, e são carregadas quando da disponibilidade de excesso de energia e descarregadas de acordo com a necessidade de uso da energia estocada

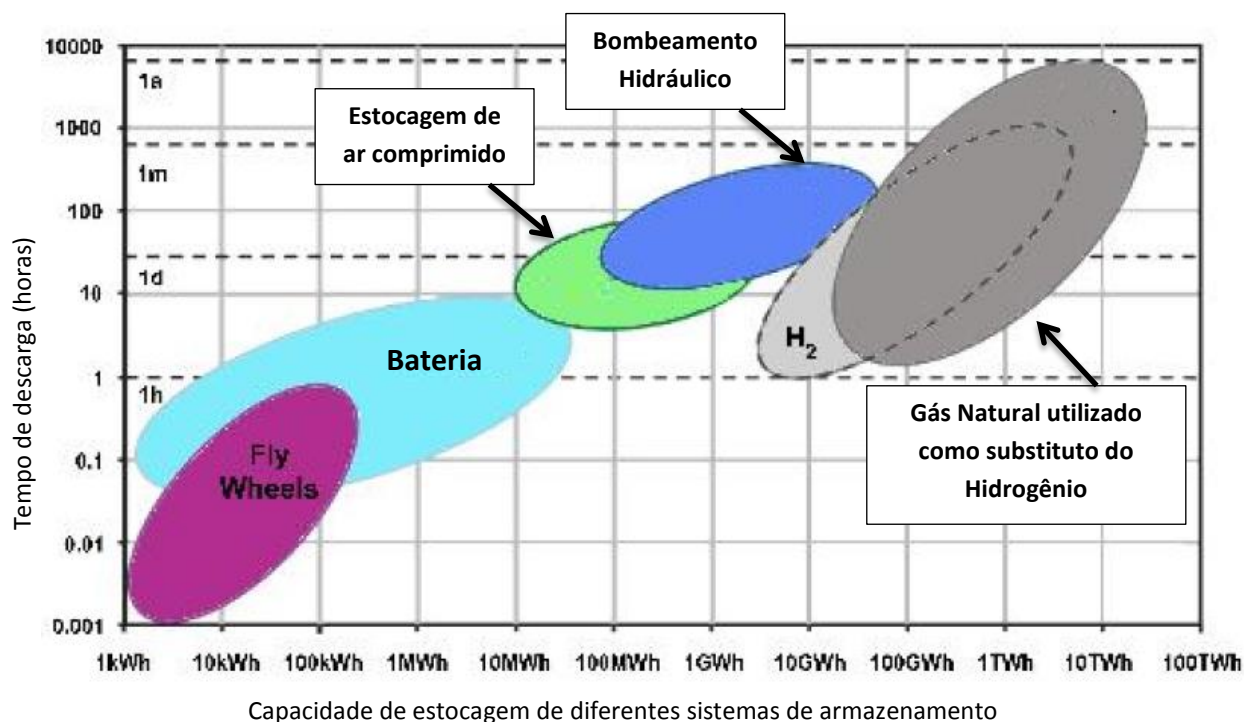
(AIE, 2014b). As baterias podem ser compostas por lítio, sódio-enxofre, chumbo ácido, cádmio e podem ser, ainda, baterias de fluxo. Montgomery (2013a) aponta que a tecnologia em questão apresenta reduzido custo por unidade de energia armazenada e está preparada para melhorias de custo e eficiência, posto que é classificada como uma tecnologia madura. A AIE (2014c) destaca, por outro lado, que as barreiras à utilização das baterias em larga escala estão relacionadas a problemas associados à densidade energética, durabilidade, capacidade de carga, segurança, possibilidade de reciclagem e custo dos sistemas.

Outra tecnologia de armazenamento ainda pouco desenvolvida, mas que apresenta grande potencial é a estocagem de hidrogênio, na medida em que “o hidrogênio tem o maior conteúdo energético de todos os combustíveis, o que o torna um ótimo “veículo” de manutenção e distribuição de energia. [...] uma quantidade relativamente pequena de hidrogênio é necessária para armazenar quantidades significativas de energia.” (SCHILLER, 2014). A AIE (2014b, P.21) reforça o potencial da estocagem de hidrogênio, e aponta os desafios relacionados à sua difusão:

Essas tecnologias de estocagem tem significativo potencial devido à sua elevada densidade energética, acelerado tempo de resposta, e potencial para uso em aplicações de estocagem em larga escala. No entanto, essas tecnologias lutam contra altos custos iniciais, baixa eficiência global e problemas associados à segurança, assim como falta de infraestrutura para sua aplicação em larga escala [...]. (tradução nossa)

No gráfico da Figura 13 é estabelecida uma comparação entre tecnologias alternativas de estocagem, considerando sua capacidade e o tempo de descarga. (SNG: Substitute Natural Gas)

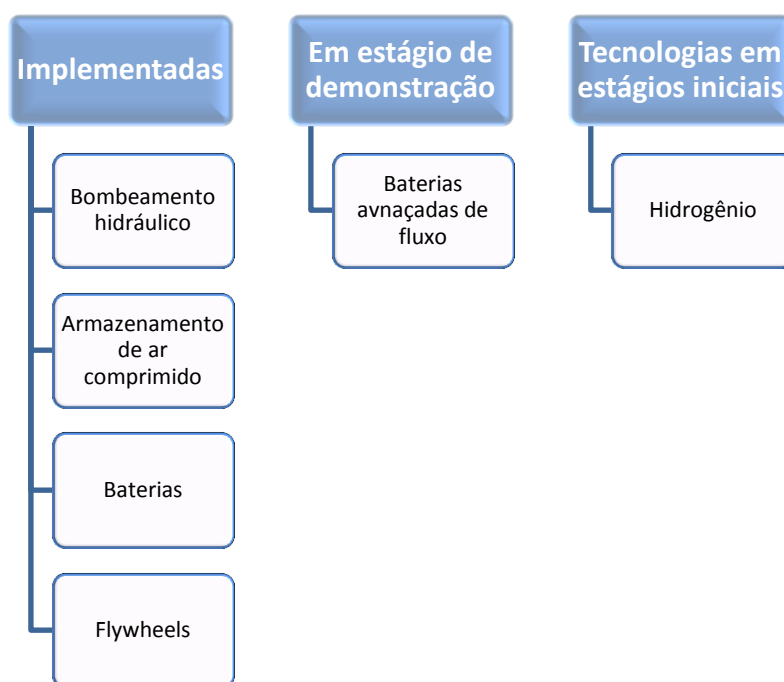
**Figura 13: Comparação entre tecnologias alternativas de estocagem de energia em termos de capacidade e tempo de descarga**



Fonte: Schiller (2014)

A Figura 14 classifica as tecnologias de estocagem de acordo com seu atual nível de maturidade.

**Figura 14: Nível de maturidade das tecnologias de estocagem apresentadas**



Fonte: adaptado de DOE (2013)

Considerando os atuais custos e níveis de desempenho das tecnologias de estocagem disponíveis, no entanto, fica evidente que ainda são pouco competitivas quando comparadas às fontes de flexibilidade alternativas, de modo que por hora não apresentam potencial de transformação do setor elétrico. A AIE (20124a) aponta que mesmo o bombeamento hidráulico e a estocagem de ar comprimido, que são tecnologias maduras e competitivas em termos de custo, ainda enfrentam restrições por prescindirem de condições geográficas muito específicas.

A tabela 1 resume as principais possibilidades de aplicação, as informações atualmente disponíveis e os principais desafios relacionados às principais tecnologias de estocagem.

**Tabela 1: Resumo acerca das principais tecnologias de estocagem**

<b>Tecnologia</b>	<b>Principais Aplicações</b>	<b>O que sabemos atualmente</b>	<b>Desafios</b>
<b>Estocagem de ar comprimido</b>	Gestão da energia; backup e reservas sazonais; integração das renováveis.	Melhores taxas de ramping em comparação com turbinas à gás ; tecnologia estabelecida, em operação desde 1970.	Geograficamente limitada; baixa eficiência; capacidade de resposta mais lenta em comparação com flywheels ou baterias; impacto ambiental.
<b>Bombeamento hidráulico</b>	Gestão da energia; backup e reservas sazonais.	Tecnologia madura e desenvolvida, elevada taxa de <i>ramping</i> ; atualmente a forma de estocagem mais eficiente em termos de custo.	Geograficamente limitada; impactos ambientais; elevado custo do projeto.
<b><i>Flywheels</i></b>	Nivelamento da carga; regulação de frequência.	Tecnologias modular; potencial de desenvolvimento; longo ciclo de vida, resposta rápida.	Limitações do rotor em resistir à tração; estocagem de energia limitada, em função das elevadas perdas decorrentes da fricção.
<b>Bateria de lítio</b>	Qualidade da energia e regulação de frequência; estabilidade transitória; amortecimento de picos.	Elevada densidade energética, bom ciclo de vida, elevada eficiência em termos de cargas/descargas.	Elevado Custo de Produção, Extremamente sensível a temperaturas e cargas excessivas, e a aumentos da pressão interna.
<b>Baterias de fluxo</b>	<i>Ramping</i> , amortecimento de picos, regulação de frequência, qualidade energética.	Capacidade para grande número de ciclos de descarga, vida útil bastante longa.	Tecnologia em desenvolvimento, ainda não está madura para comercialização em escala; <i>design</i> complexo e baixa densidade energética.
<b>Bateria avançada de Chumbo Ácido</b>	Nivelamento da carga; estabilização da rede.	Tecnologia madura, baixo custo, elevado componente reciclado; boa vida útil da bateria.	Limitada profundidade de descarga, baixa densidade energética, e tem a vida útil limitada pela corrosão do eletrodo.
<b>Bateria de Sódio Enxofre</b>	Qualidade da energia, alívio de congestionamento da rede e integração das renováveis.	Elevada densidade energética, longos ciclos de descarga, rápida resposta, longa vida e considerável potencial de desenvolvimento.	Questões associadas à retenção de líquido (corrosão, por ex.).

Fonte: adaptação a partir de tabela do relatório *Grid Energy Storage* (DOE, 2013)

Neste cenário, destaca-se o papel das políticas de promoção das tecnologias de estocagem, no sentido de acelerar seu desenvolvimento e de eliminar as principais barreiras à sua difusão. No próximo capítulo abordaremos a importância e os espaços para a atuação dessas políticas.

## **CAPÍTULO III – MAPEAMENTO DAS PRINCIPAIS BARREIRAS AO AVANÇO DA ESTOCAGEM E DOS ESPAÇOS PARA ATUAÇÃO DE POLÍTICAS DE INCENTIVO**

### ***III.1. Principais barreiras à difusão das tecnologias de estocagem***

Conforme apresentado anteriormente, as tecnologias de estocagem de energia podem desempenhar inúmeras funções nos sistemas elétricos. No atual contexto de crescente participação das fontes renováveis variáveis, o papel dessas tecnologias torna-se ainda mais relevante, na medida em que a integração das ERV eleva consideravelmente os níveis de incerteza e de imprevisibilidade do abastecimento, o que resulta no aumento da demanda por flexibilidade. No entanto, as tecnologias de armazenamento estão sujeitas a diversas restrições no curto prazo que acabam por limitar sua difusão.

Em publicação sobre as tecnologias de estocagem, o Departamento de Energia dos Estados Unidos (*U.S. Department of Energy*) identificou as quatro principais barreiras à difusão dessas tecnologias, são elas<sup>2</sup>:

- 1. Sistemas de estocagem de energia custo competitivos: é essencial que o custo total dos sistemas de estocagem (incluindo os componentes do subsistema, a instalação, e os custos de integração) seja competitivo com as opções alternativas. Neste sentido, é apontada a necessidade de direcionar os esforços de redução de custos para o sistema como um todo, e não apenas aos componentes de estocagem (a exemplo das baterias), que representam apenas cerca de 30% a 40% do custo total do sistema. Simultaneamente, há a necessidade de quantificar o valor da estocagem considerando os diversos serviços que presta ao sistema elétrico, na medida em que uma única solução de estocagem tem o potencial de captar diversas fontes de lucro, e assim viabilizar sua economicidade;*
- 2. Definição de parâmetros de desempenho e segurança operacional: a falta de parâmetros acerca do desempenho e da segurança operacional das tecnologias de estocagem que se enquadrem nos padrões de avaliação estabelecidos representa um*

---

<sup>2</sup> Extraídos de: *Grid Energy Storage* (2013: 30).



*grande entrave a sua aplicação. No caso das baterias, por exemplo, há grande incerteza no que tange a sua vida útil e ao período durante o qual um sistema de estocagem é capaz de gerar lucros, fatores que são levados em conta quando do cálculo dos investimentos. Testes e demonstrações que garantam ampla compreensão acerca desses fatores podem elevar consideravelmente a atratividade desses sistemas. Destaca-se, ainda, a necessidade de incorporação dos padrões de segurança aos sistemas de estocagem, no sentido de garantir que sua instalação em áreas urbanas ou próximas a outros componentes da rede não signifique uma ameaça à segurança do sistema;*

- 3. Ambiente regulatório justo: a definição de um modelo de geração de lucros para os operadores dos sistemas de estocagem é essencial para o estímulo a novos investimentos. Atualmente, no entanto, não há uma metodologia de precificação dos sistemas coerente, o que acaba por inibir os investimentos. No sentido de atingir esse objetivo se faz necessária a redução dos obstáculos institucionais e regulatórios para níveis compatíveis com os obstáculos que se aplicam às soluções alternativas;*
- 4. Aceitação da indústria: a aplicação das tecnologias de estocagem ainda envolve grandes níveis de incerteza, posto que atualmente, a experiência dos operadores com os sistemas de estocagem ainda é bastante limitada. A integração do armazenamento de energia a modelos de planejamento, transmissão e distribuição utilizados na indústria é apontada como potencial incentivo ao investimento, na medida em que permitiria que análises consistentes e confiáveis acerca das vantagens e desvantagens associadas à aplicação das tecnologias de estocagem fossem produzidas.*

A Tabela 2 resume as principais estratégias recomendadas no sentido de superar os desafios enumerados acima.

**Tabela 2: Estratégias de superação das principais barreiras à difusão dos sistemas de estocagem**

<b>Desafio/ Objetivo</b>	<b>Resumo da estratégia</b>
<b>Sistemas de estocagem de energia custo competitivos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Investigação científica direcionada para materiais fundamentais, transporte, processo, e fenômenos que propiciem a descoberta de novas tecnologias de estocagem;</li> <li>• Pesquisa de Engenharia em materiais e sistemas no sentido de resolver questões tecnológicas chaves assim como desafios de desempenho de tecnologias conhecidas e emergente;</li> <li>• Desenvolvimento de modelos de custo das tecnologias de estocagem que possam guiar as atividades de P&amp;D .</li> </ul>
<b>Definição de parâmetros de desempenho e segurança operacional</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desenvolvimento de protocolos de teste padronizados e de testes independentes de protótipos de equipamentos de estocagem;</li> <li>• Intensificação dos programas de P&amp;D focados na análise de mecanismos de falha e sua respectiva mitigação.</li> </ul>
<b>Ambiente regulatório justo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Colaboração entre os setores público e privado no sentido de avaliar os benefícios da estocagem;</li> <li>• Exploração de mecanismos neutros de monetização dos serviços prestados pelos sistemas de estocagem.</li> </ul>
<b>Aceitação da indústria</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Testes e demonstrações colaborativos que viabilizem a acumulação de experiência e avaliação de desempenho, especialmente para facilitar a integração das renováveis;</li> <li>• Desenvolvimento de ferramentas de <i>design</i> de sistemas de armazenamento para diversos serviços de rede.</li> </ul>

Fonte: adaptação a partir de tabela do relatório *Grid Energy Storage* (DOE, 2013)

Neste cenário, a cooperação internacional, a determinação de políticas governamentais de incentivo as tecnologias de estocagem, e as parcerias público-privado são cruciais para o seu desenvolvimento e para eliminar progressivamente essas restrições.

### **III.2. Espaços para a atuação do governo**

A Agência Internacional de Energia (2014c) aponta que as políticas de promoção do armazenamento de eletricidade devem se concentrar em reduzir os custos das tecnologias de estocagem, que são considerados a principal barreira à sua ampla aplicação, através do investimento massivo em pesquisa e desenvolvimento. É necessário, no entanto, o mapeamento das tecnologias que já são alvo de esforços de pesquisa, e que recebem os recursos necessários para tal, e daquelas que não se enquadram nessa descrição.

Os governos podem desempenhar um importante papel no apoio a pesquisa e desenvolvimento em estocagem de energia. Diversas tecnologias de

armazenamento de energia ainda estão em estágio de desenvolvimento e dependem de investimentos em pesquisa científica básica, o que significa que pode levar muitos anos até que possam ser comercializadas. Paralelamente aos investimentos em ciência básica de P&D, os formuladores de políticas também podem apoiar o investimento no aperfeiçoamento dos processos de produção dos aparelhos de estocagem de energia. (tradução nossa) (MGI, 2013:116)

Argumenta-se, por outro lado, que a ampla aplicação das tecnologias de estocagem também depende muito de condições favoráveis de recuperação de custos. As atuais políticas e condições de mercado, no entanto, tendem a ocultar os reais custos dos serviços energéticos, de modo a criar distorções de preços que impedem que as soluções de estocagem sejam adequadamente remuneradas pelas contribuições prestadas aos sistemas elétricos, na medida em que não se considera, por exemplo, que a instalação de sistemas de armazenamento de eletricidade permite adiar investimentos em infraestrutura de transmissão, confere maior segurança energética e ganhos de eficiência, do que resulta que o preço atribuído a esses sistemas não reflete seu real valor. Deste modo, recomenda-se que os governos atuem no sentido de identificar e eliminar distorções de preços que resultem em um artificial impacto negativo sobre os custos da estocagem, e adotem mecanismos de compensação pelos serviços prestados pelos sistemas de armazenamento. “A menos que compensações para os serviços dos sistemas de armazenamento de energia sejam fornecidas – ou mecanismos confiáveis de recuperação de custo sejam estabelecidos – será difícil atingir altos níveis de implantação das tecnologias de estocagem [...]” (AIE, 2014b, P.46).

Outro importante espaço para atuação governamental consiste na definição das medidas regulatórias que incidirão sobre os sistemas de estocagem de energia, de modo a estabelecer regras claras e bem definidas capazes de dar suporte às políticas de promoção e de assegurar a competitividade dessas tecnologias.

Em diversos países, inúmeras medidas de apoio ao desenvolvimento das tecnologias de estocagem têm tido impacto extremamente positivo nesse campo. Alguns exemplos são<sup>3</sup>:

- *No China, o governo central tem dado apoio financeiro a demonstração de projetos como o Zhangbei, com a proposta de instalação de uma bateria de lítio com capacidade de 36 KWh em Zhangbei, e a testes de desempenho, a exemplo do projeto Hebei, que objetiva avaliar o valor da estocagem de energia na promoção de flexibilidade a rede elétrica.*

---

<sup>3</sup> Extraídos de: *Technology Roadmap – Energy Storage* (AIE, 2013: 47).

- *Na Alemanha, o governo federal, por um lado, dá apoio a atividade de P&D no âmbito do programa de pesquisa energética e da “iniciativa de financiamento ao armazenamento”, além de financiar um site que disponibiliza dados acerca do progresso dos projetos. Já o Ministério do Meio Ambiente, Conservação da Natureza e Segurança Nuclear subsidiou projetos de estocagem de energia em pequena escala, com o objetivo de promover a estocagem distribuída enquanto mecanismo de apoio a pequenos sistemas de geração fotovoltaica.*
- *Na Coréia do Sul, o Ministério de Comércio, Indústria e Energia concedeu financiamento público a demonstração do projeto de uma bateria de lítio de 4 MW, e a uma bateria de lítio de 8 MW a ser instalada com a finalidade de controle de frequência.*
- *Nos Estados Unidos, o Departamento de Energia criou a Base de Dados Global sobre Estocagem de Energia (Global Energy Storage Database), um importante mecanismo de colaboração internacional. Já a Comissão de Serviços Públicos da Califórnia, através de um mandato direto exigiu que as três maiores concessionárias públicas investissem em 1.3 GW de nova capacidade de estocagem até 2020. A Comissão Federal de Regulação Energética (FERC na sigla em inglês), por sua vez, através das Ordens 755 e 784 contribui ativamente para a abertura dos mercados elétricos americanos para as tecnologias de estocagem, para o estabelecimento de contratos pela regulação da frequência e permite que empresas de menor porte, além das grandes concessionárias públicas, prestem serviços elétricos auxiliares, propiciando, assim, a redução das distorções de preço e a evolução dos mercados.*

### ***III.3. A questão regulatória***

É consenso que a política regulatória também consiste um fator capaz de exercer forte influência do desenvolvimento das tecnologias de estocagem de energia. É importante notar, no entanto, que o aparato regulatório atual não dispõe de regras perfeitamente aplicáveis aos sistemas de armazenamento. A questão chave consiste na ampla aplicabilidade dessas tecnologias, que podem dar suporte a diferentes segmentos do sistema elétrico simultaneamente, como oferta e demanda ou transmissão e distribuição, por exemplo. Em contrapartida, nos sistemas desverticalizados, costuma haver medidas regulatórias específicas

para cada segmento, de modo que essa “multifuncionalidade” associada à estocagem impõem grandes desafios regulatórios.

Destaca-se, por um lado, o papel da política regulatória no sentido de garantir a competitividade das tecnologias de estocagem em relação às fontes de flexibilidade alternativas. Manyika *et al.* (2013) citam o caso das baterias como possível alvo de medidas regulatórias. As baterias podem assumir funções típicas de geração, como fornecer energia ao sistema em horários de pico de demanda, assim como funções características do segmento de transmissão e distribuição, adiando investimentos em nova infraestrutura de T&D, por exemplo. A aplicação das baterias em cada uma dessas funções isoladamente implicaria em custos muito altos, pouco atrativos; já sua aplicação combinada, em ambos os segmentos, aumentaria a competitividade das baterias, posto que seu custo passaria a ser comparado ao custo de investir em duas soluções distintas. O Instituto aponta, assim, que a formulação de medidas regulatórias adequadas poderia impedir que as baterias fossem empregadas com funções únicas, assim como evitar que as soluções de estocagem de energia tenham que competir com ativos de geração (como as plantas de geração a gás de pico) pela regulação da frequência e pela geração de carga de pico.

De um modo mais geral, a definição de um quadro regulatório claro pode contribuir para a agregação dos serviços prestados pelos sistemas de armazenamento de energia, viabilizando, assim, a formação de portfólios de serviços, que aumentem a atratividade e a economicidade da estocagem, ampliando sua competitividade frente às opções alternativas.

Por outro lado, em mercados elétricos liberalizados a regulação é crucial no sentido de definir os direitos de propriedade e de controle sobre os ativos de estocagem de energia, o que determinará em grande medida a atratividade do investimento. De acordo com a AIE (2014a), são possíveis duas opções em termos de abordagem regulatória: as tecnologias de estocagem podem ser consideradas ativos regulados, assim como a rede elétrica o é, ou como ativos com livre acesso (tal como a geração), sujeitos às leis de mercado. No primeiro caso, as soluções de armazenamento seriam controladas pelo operador do sistema, de modo que os benefícios ao sistema como um todo seriam maximizados. No entanto, o direito de controle sobre os ativos de estocagem daria ao operador o poder de influenciar e de intervir no mercado elétrico, o que não é desejável. Outro ponto negativo associado a esta opção regulatória consiste na tendência ao baixo ritmo de inovação, na medida em que nos mercados regulados há uma menor propensão ao investimento em ativos com risco elevado (neste caso traduzidos nas novas tecnologias de estocagem), de modo que o investimento em soluções maduras, com

retorno do capital garantido, são preferíveis, em detrimento das novas tecnologias. Já na segunda abordagem regulatória, do livre acesso às tecnologias de estocagem, haveria maior competição e maior estímulo à inovação tecnológica.

“O quadro regulatório, portanto, impacta fortemente o modelo de negócios e as oportunidades para estocagem de energia e, sob a perspectiva de políticas, é pensado como uma prioridade chave para apoiar a implantação eficiente e bem sucedida das tecnologias de estocagem.” (tradução nossa) (AIE, 2014c: 263).

### ***III.2. O papel da cooperação internacional***

A cooperação internacional pode contribuir amplamente para o desenvolvimento e a difusão das tecnologias de estocagem. De acordo com a AIE (2014a:239) a formação de uma base de dados a nível nacional e internacional consiste em um importante mecanismo de promoção das atividades de pesquisa e desenvolvimento e de acompanhamento do progresso das tecnologias de estocagem, assim como de seus principais gargalos.

O projeto de uma base de dados constantemente alimentada com informações acerca do progresso das tecnologias de estocagem a nível internacional poderia contribuir para a produção de análises técnicas mais refinadas das tecnologias existentes, assim como colaborar para as pesquisas voltadas para o desenvolvimento de novos sistemas de armazenamento.

A Base de Dados Global sobre Estocagem de Energia (Global Energy Storage Database), criada pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, é a principal solução lançado nessa área, e consiste em uma base de dados *online* com acesso grátis, que reúne dados acerca de projetos e instalações de sistemas de estocagem de energia a nível global, tendo como principal objetivo colaborar para o crescimento da indústria de estocagem de energia através do fornecimento de dados que permitam a construção de análises por diversos usuários (HUFF, 2014). No entanto, para que a Base de Dados global tenha uma abrangência maior é necessário que outros países também contribuam com dados de entrada.

Recomenda-se, além disso, que as economias desenvolvidas promovam a formação de zonas livres que facilitem o teste de novas tecnologias de estocagem através da eliminação de estruturas políticas promotoras de distorções e de quaisquer barreiras de origem não técnica que dificultem a realização de testes. “No entanto, a exposição ao mercado é essencial para a implantação generalizada das tecnologias de estocagem de energia. Projetos de demonstração não deveriam, portanto, ser limitados a essas zonas livres.” (AIE, 2014b: 54).

## CONCLUSÃO

O aumento da participação das ERV na matriz elétrica se dá em função dos esforços internacionais de redução das emissões de carbono, e implica no aumento substancial dos níveis de imprevisibilidade e de incerteza associadas à oferta de energia, de modo que o sistema passa a demandar níveis maiores de flexibilidade, no sentido de garantir o constante equilíbrio entre a oferta. Nesse contexto, os sistemas de armazenamento de energia emergem como possível fonte de flexibilização do setor. As soluções concorrentes, por sua vez, consistem na geração térmica despachável, na expansão e modernização da rede elétrica e nas políticas de integração pelo lado da demanda.

As tecnologias de estocagem são capazes prestar uma infinidade de serviços aos sistemas elétricos, podendo ser aplicadas em diferentes escalas, integradas à rede ou à sistemas de geração distribuída, e em diferentes segmentos do sistema, oferecendo, assim, uma versatilidade ímpar. Dentre as principais aplicações da estocagem se destacam: estocagem sazonal, arbitragem de preços, regulação de frequência, acompanhamento da carga, suporte de tensão, capacidade de arranque autônomo, adiamento de investimento em infraestrutura, suporte a sistemas não conectados à rede, integração dos recursos variáveis de energia, e atuação como reservas circulantes e não-circulantes.

No entanto, diversos fatores comprometem a competitividade das tecnologias de estocagem, com destaque para os altos custos e baixos níveis de desempenho dos sistemas de armazenamento, de modo que se tornam menos atrativas, em termos econômicos frente as soluções alternativas.

Portanto, dadas as restrições relacionadas à ampla aplicação dos sistemas de armazenamento de energia no setor elétrico, e a necessidade de substancial desenvolvimento até que se tornem competitivas o suficiente, não acreditamos que a estocagem tenha potencial de transformar a dinâmica dos sistemas elétricos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bicalho, R., 2011. Dos fósseis aos renováveis: a difícil transição energética. Blog Infopetro.
- Bicalho, R., 2013. A transição energética: aberta, indefinida e indeterminada. Blog Infopetro.
- Bitterly, J., 1998. Flywheel Technology: Past, Present, and 21st Century Projections. IEEE Aerospace and Electronics Systems Magazine; 13:13–6.
- Bullis, K., 2014. Smart Forecasts Lower the Power of Wind and Solar [WWW Document]. MIT Technology Review. URL <http://www.technologyreview.com/featuredstory/526541/smart-wind-and-solar-power/> (accessed 1.6.15).
- Bullis, K., 2013. Turbinas Eólicas, Baterias Inclusas, Podem Manter Suprimentos de Energia Estável - MIT Technology Review [WWW Document]. Technology Review. URL [http://www.technologyreview.com.br/read\\_article.aspx?id=43054](http://www.technologyreview.com.br/read_article.aspx?id=43054) (accessed 1.6.15).
- Costa, R.C. da, Prates, C.P.T., 2005. O papel das fontes renováveis de energia no desenvolvimento do setor energético e barreiras à sua penetração no mercado [WWW Document]. URL <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2436> (accessed 1.9.15).
- Fernandes, D., 2013. Risco e Incertezas das Fontes Renováveis na Produção de Energia Elétrica. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa.
- Ferraz, C., 2012. O Plano Decenal de Expansão e a integração das fontes renováveis. Blog Infopetro.
- Gross, R., P. Heptonstall, D. Anderson, T. Green, M. Leach and J. Skea (2006) *The Costs and Impacts of Intermittency: An assessment of the evidence on the costs and impacts of intermittent generation on the British electricity network*, London, UK Energy Research Centre.
- Hallack, M., Vazquez, M., 2013. O problema da interação energia eólica, hidráulica e gás natural. Blog Infopetro.
- Hashimura, L., 2012. Aproveitamento do Potencial de Geração de Energia Elétrica por Fontes Renováveis Alternativas no Brasil: Instrumentos de Política e Indicadores de Progresso.
- Huff, G., 2014. The Role of Storage in Energy System Flexibility.
- International Energy Agency, 2014a. Energy Technology Perspectives 2014 - Harnessing



- Electricity's Potential. OECD/IEA, Paris.
- International Energy Agency, 2014b. Technology Roadmap - Energy Storage. OECD/IEA, Paris.
- International Energy Agency, 2014c. The Power of Transformation: Wind, Sun and the Economics of Flexible Power Systems. IEA Publishing, Paris.
- International Energy Agency, 2014d. Tracking Clean Energy Progress 2014. OECD/IEA, Paris.
- International Energy Agency, 2014e. World Energy Outlook. OECD/IEA, Paris.
- Losekann, L., 2013. Reestruturação do Setor Elétrico Brasileiro: Coordenação e Concorrência. Instituto de Economia da Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Manyika, J., 2013. Disruptive technologies: Advances that will transform life, business, and the global economy | McKinsey & Company [WWW Document]. URL [http://www.mckinsey.com/insights/business\\_technology/disruptive\\_technologies](http://www.mckinsey.com/insights/business_technology/disruptive_technologies) (accessed 1.6.15).
- MIT (Massachusetts Institute of Technology) (2011), "The Future of the Electric Grid", [http://mitei.mit.edu/system/files/Electric\\_Grid\\_Full\\_Report.pdf](http://mitei.mit.edu/system/files/Electric_Grid_Full_Report.pdf).
- Montgomery, J., 2013a. Energy Storage Series: Making the Case for Batteries [WWW Document]. Renewable Energy World. URL <http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2013/03/energy-storage-series-making-the-case-for-batteries> (accessed 1.6.15a).
- Montgomery, J., 2013b. Energy Storage Series: Why We Need It, And Why We Don't [WWW Document]. Renewable Energy World. URL <http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2013/04/energy-storage-series-why-we-need-it-and-why-we-dont> (accessed 1.6.15b).
- Prada, J.F., 1999. The Value of Reliability in Power Systems - Pricing Operating Reserves. MIT Energy Laboratory.
- Schiller, M., 2014. Hydrogen Energy Storage: A New Solution To the Renewable Energy Intermittency Problem [WWW Document]. Renewable Energy World. URL <http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2014/07/hydrogen-energy-storage-a-new-solution-to-the-renewable-energy-intermittency-problem> (accessed 1.6.15).
- Silva, J., 2012. Um balanço das políticas de estímulo à utilização das energias renováveis. Blog Infopetro.
- U.S. Department of Energy, 2013. Grid Energy Storage. U.S. Department of Energy, U.S.A.